BREITBAND-WASSERSCHALLABSORBER GERINGER SCHICHTDICKE

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von

Thomas Ahlswede
aus Dresden

Göttingen 1974

BREITBAND-WASSERSCHALLABSORBER GERINGER SCHICHTDICKE

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von

Thomas Ahlswede
aus Dresden

Göttingen 1974

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

D 7
Referent: Prof. Schroeder
Korreferent: Prof. Flammersfeld
Tag der mündl. Prüfung: 18.12.74

Inhalt

		Seite
1.	Einleitung	2
2.	Theoretische Grundlagen	5
3.	Untersuchungen an kleinflächigen Proben	8
	3.1. Keilabsorber	8
	3.2. Dünnschichtabsorber	9
	3.2.1. Wahl des geeigneten Resonanzsystems	9
	3.2.2. Meßergebnisse	11
4.	Untersuchungen an großflächigen Proben	14
	4.1. Meßverfahren	14
	4.2. Keilsysteme	16
	4.3. Dünnschichtige Resonanzabsorber	18
5.	Kombinierte Absorber	27
Literatur		32
Abbildungen		

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41534922_0031

Zusammenfassung

Die untere Grenzfrequenz herkömmlicher Keilabsorber für Wasserschall wird durch Kombination mit neuentwickelten Dünnschicht-Zweikreis-Resonanzabsorbern wesentlich herabgesetzt. An klein- und großflächigen Proben werden zunächst Impedanzortskurven verschiedener Keilsysteme gemessen und eine für die Kombination geeignete Anordnung ausgewählt. Der Absorptionsmechanismus des Dünnschichtabsorbers beruht auf der erzwungenen Wechselströmung einer zähen Flüssigkeit durch die engen Schlitze schwach gedehnter Schraubenfedern (zylindrische Schlitzsiebe). Der Aufbau und die Abstimmungsmöglichkeiten dieser Dünnschichtproben werden ausführlich beschrieben. Dabei zeigt sich, daß das akustische Verhalten der kleinflächigen Proben sehr gut durch ein einfaches elektrisches Ersatzschaltbild dargestellt wird. Für die großflächigen Proben trifft dies, vermutlich aufgrund von Querströmungen, nur bedingt zu.

Für die experimentelle Entwicklung einer optimalen großflächigen Keil-Resonanz-Absorberkombination wird der Keilabsorber rückseitig mit verschiedenen Dünnschichtproben abgeschlossen. Die akustische Anpassung beider Absorbertypen erfolgt durch Veränderung der Eingangsimpedanz des Resonanzabsorbers. Diese Untersuchungen führen zu einer breitbandig wirksamen Kombination mit einer Gesamtschichtdicke von 13,5 cm und einer unteren Grenzfrequenz von 5,5 kHz. Der Amplitudenreflexionsfaktor liegt im gesamten untersuchten Frequenzbereich unter 10 %.

1. Einleitung

Zur Absorption von Wasserschall werden entweder verlustbehaftete Keile /6/ oder im Vergleich zur Wellenlänge dünnschichtige Resonanzanordnungen benutzt /1-5/. Diese Dünnschichtabsorber lassen sich dem Absorptionsmechanismus nach in zwei Gruppen einteilen. Für die Absorption verwendet man bei der einen Gruppe die durch Relaxationsvorgänge hervorgerufenen mechanischen Verluste in Elastomeren /1,4/, bei der anderen Gruppe von Dünnschichtabsorbern werden die Reibungsverluste erzwungener Wechselströmungen von zähen Flüssigkeiten ausgenutzt /2,3,5/. Dies sind die sogenannten Strömungsabsorber, die gegenüber den Absorptionsanordnungen der ersten Gruppe den Vorteil einer großen Temperaturunabhängigkeit zeigen /3,5/. Stellt man zusätzlich die Forderung einer weitgehenden Druckunabhängigkeit, so führt dies zu ölgedämpften Resonanzabsorbern, bei denen Silikonöl als zähe Flüssigkeit durch enge Schlitze gezwungen wird /5/. Diese prinzipielle Absorptionsanordnung kann man als Einkreisresonanzabsorber aufbauen /5/, oder man kann durch Erweiterung zum Zweikreisresonanzabsorber die Frequenzbandbreite erhöhen, wie in dieser Arbeit gezeigt wird.

Zur Auskleidung von reflexionsarmen Wasserschallbecken werden im allgemeinen Keil- oder Rippenabsorber verwendet. Man benutzt dazu gummielastische Stoffe, die bei Verformung Verluste aufweisen und in ihren akustischen Eigenschaften annähernd an das Wasser angepaßt sind. Gut bewährt hat sich ein verlustbehaftetes Gummimaterial, das, mit makroskopischen Hohlräumen versehen, zum Herstellen der absorbierenden Wandauskleidung von Tieftanks für Wasserschall-Freifeldmessungen diente /6/.

Definiert man als untere Grenzfrequenz eines Keilabsorbers diejenige Frequenz, bei der der Amplitudenreflexionsfaktor den Wert von 10 % übersteigt, so erhält man als notwendige Keillänge etwa 2/3 bis eine Wellenlänge des zu absorbierenden Wasserschalls. Aus wirtschaftlichen und Gründen der Raumeinsparung wird beim Bau von reflexionsarmen Räumen angestrebt, diese Schichtdicke so klein wie möglich zu halten bzw. bei gegebener Tiefe der absorbierenden Schicht die untere Grenzfrequenz so tief wie möglich zu legen.

Ziel dieser Arbeit war es deshalb, das Absorptionsverhalten von Keilanordnungen durch Abschluß mit dünnschichtigen Resonanzabsorbern zu tiefen Frequenzen hin zu verbessern, was auf dem Gebiet des Luftschalles bereits durchgeführt wurde /7/. Dabei ist es nicht selbstverständlich, daß der hinter die Anordnung verlustbehafteter Keile gesetzte Resonanzabsorber die gleichen akustischen Eigenschaften zeigt wie ohne Keile, da in diesem Fall ganz andere Anpassungsbedingungen gegeben sind.

Die optimale Absorberanordnung einer solchen Kombination sollte dann die folgenden physikalischen Eigenschaften besitzen: Die untere Grenzfrequenz des Keilabsorbers wird durch rückseitigen Abschluß mit dem Resonanzabsorber erniedrigt; im Bereich tiefer Frequenzen führt dieser die Absorption durch, wobei die Keile akustisch transparent sein sollten. Zu höheren Frequenzen hin übernimmt die Keilanordnung die Dämpfung der einfallenden Schallwellen, so daß die Absorptionsbandbreite deutlich erweitert wird.

Die vorliegende Arbeit beschreibt den Aufbau von Proben beider Absorbertypen und die Untersuchung ihrer Eingangsimpedanzen. Die Messungen galten sowohl "kleinflächigen"

Meßobjekten, d.h. Absorbern mit einer Fläche von etwa 20 cm^2, als auch in dieser Arbeit mit "großflächig" bezeichneten Proben, deren quadratische Fläche (34 cm x 34 cm) etwa 1000 cm^2 betrug. Wie die Untersuchungen zeigen, ist es nicht selbstverständlich, daß die mit denselben physikalischen Daten aufgebauten Meßobjekte verschiedener geometrischer Größe gleiche akustische Eigenschaften besitzen.

Die Arbeit schließt mit der experimentellen Entwicklung einer großflächigen Keil-Resonanz-Absorberkombination.

2. Theoretische Grundlagen

Eine inhomogene Schicht, wie die aus einer Keilanordnung bestehende Übergangsschicht, ist theoretisch nur schwer zu behandeln. Der Keilabsorber soll deshalb als inhomogenes Leitungsstück betrachtet werden, dessen Verhalten man mit Hilfe der Vierpoltheorie aus Widerstandsmessungen berechnen kann. Die Bestimmungsgrößen dieser akustischen Leitung sind die Leerlauf- und Kurzschlußwiderstände in der Eingangsebene 1 und der Ausgangsebene 2 (siehe Fig. 1): $\underline{W}_{1L}$; $\underline{W}_{1K}$; $\underline{W}_{2L}$; $\underline{W}_{2K}$. Damit erhält man die beiden Wellenwiderstände $\underline{Z}_1$ und $\underline{Z}_2$:

$$\underline{Z}_1 = \sqrt{\underline{W}_{1L} \cdot \underline{W}_{1K}}\,; \qquad \underline{Z}_2 = \sqrt{\underline{W}_{2L} \cdot \underline{W}_{2K}}$$

und das Übertragungsmaß $\underline{g}$ der Leitung:

$$e^{-2\underline{g}} = \frac{\underline{W}_{1L} - \underline{Z}_1}{\underline{W}_{1L} + \underline{Z}_1} = \frac{\underline{W}_{2L} - \underline{Z}_2}{\underline{W}_{2L} + \underline{Z}_2}\,.$$

Die aus Keilabsorber und dünnschichtigem Resonanzabsorber zusammengesetzte Anordnung ist Fig. 1 zu entnehmen: Vom Schallsender kommend durchläuft die Welle eine Leitung vom Wellenwiderstand $Z_o = \varrho c$ und trifft in der Ebene 1, der Eingangsebene der gesamten Kombination, auf die Keilanordnung, der dort der Wellenwiderstand $\underline{Z}_1$ zugeordnet wird. Nach Durchlaufen des Keiles geht die Welle (soweit noch vorhanden) an dessen Ende (Wellenwiderstand $\underline{Z}_2$) in der Ebene 2 in den dünnschichtigen Resonanzabsorber mit dem Eingangswiderstand $\underline{W}_2$ über. $\underline{W}_2$ wird durch das inhomogene Leitungsstück der Keilanordnung in einen Widerstand $\underline{W}_1$ in der Ebene 1 transformiert. Für die Eingangsimpedanz der gesamten Absorptionsanordnung ergibt sich dann aus Transformationsgleichungen der Vierpoltheorie:

$$\underline{W}_1 = \underline{Z}_1 \frac{1 + \frac{\underline{W}_2 - \underline{Z}_2}{\underline{W}_2 + \underline{Z}_2} e^{-2\underline{g}}}{1 - \frac{\underline{W}_2 - \underline{Z}_2}{\underline{W}_2 + \underline{Z}_2} e^{-2\underline{g}}} \quad ,$$

und der Reflexionsfaktor $\underline{r}$ lautet:

$$\underline{r} = \frac{\underline{W}_1 - Z_o}{\underline{W}_1 + Z_o} \quad . \tag{1}$$

Führt man die folgenden Ausdrücke ein:

$$\underline{r}_1 = \frac{\underline{Z}_1 - Z_o}{\underline{Z}_1 + Z_o} \quad \text{und} \quad \underline{r}_2 = \frac{\underline{W}_2 - \underline{Z}_2}{\underline{W}_2 + \underline{Z}_2} \quad ,$$

so erhält man statt Gl. (1):

$$\underline{r} = \frac{\underline{r}_1 + \underline{r}_2 \cdot e^{-2\underline{g}}}{1 + \underline{r}_1\underline{r}_2 \cdot e^{-2\underline{g}}} \quad . \tag{2}$$

Somit kann man den Reflexionsfaktor $\underline{r}$ der gesamten Kombination im Fall $|e^{-2\underline{g}}| \ll 1$ aus zwei Teilreflexionen zusammengesetzt denken: $\underline{r}_1$ stellt die nur vom Keilabsorber herrührende Reflexion, $\underline{r}_2$ die von der Fehlanpassung zwischen Keil- und Resonanzabsorber verursachte Reflexion dar.

Durch geeignete Wahl der Keilparameter kann $\underline{r}_1$ ab einer bestimmten unteren Grenzfrequenz klein gehalten werden. Dies ist für $\underline{r}_2$ schwieriger durchzuführen, da bei einmal vorgegebenen Keilparametern nur noch durch Veränderung des Eingangswiderstandes $\underline{W}_2$ des dünnschichtigen Resonanzabsorbers Anpassung in der Ebene 2 erreicht werden kann. Schließlich geht bei der Zusammensetzung des Gesamtreflexionsfaktors $\underline{r}$ aus $\underline{r}_1$ und $\underline{r}_2 \cdot e^{-2\underline{g}}$ gemäß Gl. (2) noch das Übertragungsmaß der inhomogenen Leitung ein.

Zur experimentellen Entwicklung einer akustisch wirksamen Kombination, bestehend aus einer verlustbehafteten Keilanordnung und einem dünnschichtigen Resonanzabsorber, waren daher zunächst Messungen an verschiedenen Keilabsorbern vorzunehmen. Die daran anschließenden Untersuchungen wurden ausschließlich an Dünnschichtabsorbern mit dem Ziel durchgeführt, die Möglichkeiten der Variation von $\underline{W}_2$ zu zeigen. Außerdem ergaben diese Messungen, inwieweit das elektrische Ersatzschaltbild das akustische Verhalten der Resonanzabsorber darstellen kann. Schließlich wurde der Dünnschichtabsorber durch Veränderung von $\underline{W}_2$ an einen geeigneten Keilabsorber akustisch angepaßt.

3. Untersuchungen an kleinflächigen Proben

Die Messungen wurden nach der Impuls-Echo-Methode in einem Kundtschen Rohr für Wasserschall durchgeführt, in dem die Schallgeschwindigkeit praktisch dem Wert des Freifeldes gleich kam. Auf Grund der geometrischen Abmessungen des Rohres (Innendurchmesser 5 cm, Länge 2 m) betrug der Frequenzbereich dieser Untersuchungen etwa 4 kHz bis 12 kHz.

3.1. Keilabsorber

Zum Aufbau der Proben wurde das gleiche verlustbehaftete Material benutzt, das zur Wandauskleidung eines reflexionsfreien Meßbeckens diente /6/. Es handelt sich dabei um Gummiplatten, die aus 3 festverklebten Schichten zusammengesetzt sind. Davon ist die mittlere Schicht mit kreiszylindrischen Löchern versehen. Als günstig erwies sich bei einer Lochgröße von 4 mm eine Lochdichte von 4 % /6/. Die Verluste dieses gummielastischen Stoffes werden im wesentlichen durch den Verlustfaktor des Schubmoduls bestimmt.

Fig. 2 zeigt die Eingangsimpedanzkurve eines 11 cm langen Keiles, dargestellt in der komplexen Scheinwiderstandsebene. Der Amplitudenreflexionsfaktor liegt zwischen 4 kHz und 12 kHz im Bereich von 60 bis 80 %. Setzt man eine Probe aus 2 Keilen dieser Form und Abmessungen zusammen, so ergibt sich die Impedanzkurve von Fig. 3. In diesem Fall wurden Reflexionen zwischen 40 und 70 % gemessen. Durch weitere Hinzunahme eines Keiles verringerte sich der Reflexionsfaktor noch einmal. Die Erhöhung der verlustbehafteten Gummimaterialmenge führt allerdings dann nicht mehr zu weiterer Absorptionszunahme, wenn Frontreflexionen der Probe auftreten. Diese können durch Fehlanpassung zwischen

Wasser und dem Keilmaterial entstehen. Damit ergaben diese Messungen, daß man durch Änderung der Keildichte den Reflexionsfaktor variieren kann.

Zur Untersuchung, in wieweit die geometrische Form der Keilabsorber die akustischen Eigenschaften beeinflußt, wurde die Eingangsimpedanz eines Keils nach Fig. 4 gemessen. Diese Probe hat bis auf die geometrische Form die gleichen Abmessungen wie der Keil von Fig. 2. Vergleicht man beide Ergebnisse, so ergeben sich praktisch keine Unterschiede. Zumindest im untersuchten Frequenzbereich scheint damit der Reflexionsfaktor nicht wesentlich von der äußeren Form abzuhängen.

Will man breitbandig absorbieren, so haben sich Proben als besonders günstig erwiesen, die aus Keilen verschiedener Länge aufgebaut waren. Man ordnet sie so an, daß man im Sinne der "Fafnir"-Anwendung /8/ ein Parallel-Platten-System erhält. Der Wasserschall trifft damit parallel zu den verlustbehafteten, gummielastischen Platten auf die Anordnung und dringt in die "Kanäle" zwischen den vorn ausgezackten Platten, den Keilen, ein /8/. Dabei klingt die Welle durch Dämpfung exponentiell ab. Die Impedanzkurve einer ähnlich aufgebauten, kleinflächigen Probe, bestehend aus zwei 11 cm und zwei 6 cm langen Keilen, ist in Fig. 5 dargestellt. Ein Vergleich mit Fig. 3 zeigt die deutliche Absorptionsverbesserung, die auf die beiden zusätzlich verwendeten 6 cm langen Keile zurückzuführen ist. Der Reflexionsfaktor liegt im Bereich von 4 kHz bis 12 kHz zwischen 20 und 45 %.

3.2. Dünnschichtabsorber

3.2.1. Wahl des geeigneten Resonanzsystems

Der akustische Abschluß der in dieser Arbeit angestrebten kombinierten Absorptionsanordnung soll von einem bezüglich

Frequenz, Temperatur und statischem Druck breitbandigen Dünnschichtresonanzabsorber realisiert werden. Dazu ließe sich ein ölgedämpfter Einkreisresonanzabsorber mit ebenem Strömungssieb verwenden /5/. Eine Erhöhung der Frequenzbandbreite auf etwa das Dreifache liefern jedoch Zweikreisresonanzsysteme /3/. Der prinzipielle Aufbau dieser ölgedämpften Proben, die gegenüber früheren Konstruktionen zudem den Vorteil des einfacheren Herstellens vor allem im Hinblick auf großflächige Absorber haben, geht aus Fig. 6 hervor: Parallel zu einer als Rückmasse dienenden Metallplatte befindet sich in definiertem Abstand eine zylinderförmige Anordnung, im folgenden als "Siebkörper" bezeichnet. Dieser Siebkörper besteht aus einer Spiralfeder (Außendurchmesser 5 mm), die innen einen luftgefüllten Gummischlauch enthält. Durch Auseinanderziehen der Spiralfeder entstehen Schlitze definierter Breite d. Der Raum zwischen biegeweicher Frontplatte und Rückmasse ist mit Silikonöl gefüllt. Bei Schalleinfall stellt diese Anordnung die Hintereinanderschaltung eines mechanischen Parallelkreises und eines Serienkreises dar: Der mechanische Parallelkreis setzt sich zusammen aus der dynamischen Nachgiebigkeit des luftgefüllten Gummischlauches und der mit Reibungsverlusten durch das zylinderförmige Schlitzsieb oszillierenden Ölmasse. Der mechanische Serienkreis wird gebildet aus der Rückmasse und der dynamischen Nachgiebigkeit der Ölschicht zwischen Siebkörper und Rückmasse.

In der ersten elektromechanischen Analogie läßt sich das beschriebene mechanische System durch das in Fig. 7 abgebildete elektrische Ersatzschaltbild darstellen. Ein Serienkreis ist parallel zu einem Parallelresonanzkreis geschaltet, wobei C_1 die Nachgiebigkeit des luftgefüllten Gummischlauches, L_1 die durch das Schlitzsieb gezwungene Ölmasse, R die dabei entstehenden reellen Reibungsverluste, C_2 die Nachgiebigkeit der Ölschicht zwischen Rückmasse und Siebkörper und L_2 die Rückmasse repräsentieren.

Das gesamte Zweikreisresonanzsystem soll dem reellen Wellenwiderstand $Z_o = \varrho c$ von Wasser möglichst breitbandig angepaßt werden. Dazu müssen folgende Bedingungen erfüllt sein /3/:

a) die Resonanzfrequenzen beider Kreise stimmen überein;
b) es gilt $L_1 > C_2 R^2$ (3), womit die Impedanzkurve eine Schleife durchläuft;
c) diese Schleife wird annähernd auf den "10 %-Kreis" gelegt;
d) für den reellen Strömungswiderstand R des Schlitzsiebes gilt:

$$R = k \frac{\mu \cdot l}{d^2} \cdot F_g / F_A \approx Z_o = \varrho c \qquad (4)$$

mit k Konstante
μ Viskosität des Öles
l effektive Länge eines Strömungskanales im Schlitz
d Schlitzbreite (Abstand zweier Spiralwindungen)
F_g/F_A Verhältnis aus Gesamtfläche F_g des Absorbers zur Oberfläche F_A des zylinderförmigen Schlitzsiebes (reine Absorptionsfläche).

3.2.2. Meßergebnisse

In Fig. 8 ist die Impedanzkurve (Eingangsimpedanz $\underline{W}_2$) eines ölgedämpften Zweikreisresonanzabsorbers zwischen 3 kHz und 13 kHz dargestellt. Die Daten dieser Probe betrugen:

1. Stärke der Rückmasse 7,5 mm;
2. Abstand Siebkörper - Rückmasse 4 mm;
3. Viskosität μ des Silikonöles 1000 cSt.;
4. Schlitzbreite 0,140 mm (im Mittel).

Der Betrag des Reflexionsfaktors $\underline{r}$ ist nur dann kleiner als 10 % (r = 0,1), wenn die Ortskurve innerhalb des eingezeichneten "10 %-Kreises" liegt (Radius $2r/1-r^2 \approx 0{,}2$; Mittelpunkt auf der reellen Achse bei $(1+r^2)/(1-r^2) \approx 1$).

Hier hat sich eine Schleife deutlich oberhalb der reellen Achse gebildet. Das heißt, der mechanische Serienkreis aus Rückmasse und Nachgiebigkeit der Ölschicht zwischen Siebkörper und Rückmasse ist gegenüber dem mechanischen Parallelkreis zu hoch abgestimmt /3/. Um den Imaginärteil der Impedanzkurve von Fig. 8 zu erniedrigen, wurde die Rückmasse auf 12 mm und der Abstand Siebkörper - Rückmasse auf 6 mm erhöht, womit die Nachgiebigkeit der Ölschicht um den Faktor 1,5 vergrößert wurde. Die erwartete Veränderung zeigt Fig. 9 (Impedanzkurve der neu aufgebauten Probe).

Um den Realteil zu vergrößern, wurde durch Verringerung der Schlitzbreite auf 0,102 mm der reelle Strömungswiderstand R erhöht (vergl. Gl. (4)). Erwartungsgemäß hat sich die Schleife in den 10 %-Kreis verschoben (Fig. 10). Auffallend ist, daß dabei die Fläche in der Schleife wesentlich verkleinert wurde. Das hat folgenden Grund: Wie erwähnt, bildet die Impedanzkurve des hier vorliegenden Zweikreisresonanzsystems eine Schleife, wenn Bedingung (3) ($L_1 > C_2 R^2$) gilt. Diese Ungleichung bestimmt außerdem die Flächengröße innerhalb der Schleife. Je schärfer sie erfüllt ist, umso größere Schleifen erhält man. Mit zunehmendem Strömungswiderstand R wurde die Bedingung (3) deutlich abgeschwächt, so daß sich das experimentelle Ergebnis von Fig. 10 ergab.

Vergleicht man Fig. 8 mit Fig. 9, so stellt man ebenfalls eine allerdings geringfügige Schleifenverringerung fest. Das ist auf die Erhöhung der in Bedingung (3) linear eingehenden Größe C_2 (Nachgiebigkeit der Ölschicht zwischen Siebkörper und Rückmasse) zurückzuführen.

Ein Vergleich von Fig. 9 mit Fig. 10 zeigt, daß durch die Verkleinerung der Schlitzbreite am Strömungssieb die Schleife zu kleineren Imaginärteilen hin verschoben wurde. Das bedeutet, daß die Resonanzfrequenz des mechanischen Parallelkreises, bestehend aus der Nachgiebigkeit des luftgefüllten Gummi-

schlauches und der durch das Schlitzsieb oszillierenden Ölmasse (L_1), gegenüber dem Serienkreis höher abgestimmt worden ist. Wahrscheinlich ist das durch eine Verkleinerung dieser Ölmasse (L_1), verursacht durch die engeren Schlitze, zu erklären.

Stimmt man den mechanischen Serienkreis etwas höher ab, so müßte sich die Schleife in Fig. 10 geringfügig zu größeren Imaginärteilen verschieben. Das bestätigt Fig. 11, in der die Impedanzkurve der Probe aus Fig. 10, jedoch mit einer um 3 mm verkleinerten Rückmasse, dargestellt ist. Die Schleife liegt innerhalb des 10 %-Kreises und umläuft genau den Punkt $\underline{W} = \varrho c$ in der komplexen Impedanzebene. Im Bereich von 4,5 kHz bis 13 kHz beträgt der Reflexionsfaktor der Probe mit einer Schichtdicke von 2,5 cm weniger als 10 %. Die Daten dieses optimalen Zweikreisresonanzabsorbers sind also:

1. Stärke der Rückmasse 9 mm;
2. Abstand Siebkörper - Rückmasse 6 mm;
3. Viskosität μ des Silikonöles 1000 cSt.;
4. Schlitzbreite 0,102 mm (im Mittel).

(Eine leichte weitere Verbesserung der Absorptionseigenschaften könnte erreicht werden, indem man die Schleife bis nahe an den 10 %-Kreis vergrößert.)

Damit haben die Messungen gezeigt, daß das akustische Verhalten des beschriebenen ölgedämpften Zweikreisresonanzabsorbers sehr gut durch das elektrische Ersatzschaltbild von Fig. 7 dargestellt werden kann. Die Variationsmöglichkeit der Eingangsimpedanz $\underline{W}_2$, die für die Entwicklung einer breitbandig wirksamen Kombination aus Keil- und Dünnschichtabsorber notwendig ist (vergl. Abschnitt 2), erwies sich als gut.

4. Untersuchungen an großflächigen Proben

4.1. Meßverfahren

Auf dem Gebiet des Wasserschalls werden für viele Untersuchungen Absorber meist großflächiger Art benötigt. Zur Impedanzmessung der als "großflächig" bezeichneten Proben mit den Abmessungen 34 cm x 34 cm wurde eine schallweich ausgekleidete Wasserrinne benutzt. Man mißt die Stehwelligkeit und die Verschiebung eines Minimums im Vergleich zum schallweichen Abschluß ("Kurzschluß") und erhält damit (Smith-Diagramm) die akustische Impedanz der Probe am Abschluß der Rinne. Bei dieser Bestimmung ist außerdem die gegenüber dem Freifeld erhöhte Phasengeschwindigkeit einer schallweich ausgekleideten Wasserrinne zu berücksichtigen.

Üblicherweise arbeitet man unter folgenden Meßbedingungen: Der Querschnitt der Rinne wird bei jeder Frequenz so gewählt, daß gerade noch die (1,1)-Mode und keine höhere Mode ausbreitungsfähig ist. Das bedeutet, bei den gegebenen Abmessungen der verwendeten Rinne lag das Verhältnis Freifeldschallgeschwindigkeit C_F zu Phasengeschwindigkeit C_R in der Rinne im Frequenzbereich von 5 kHz bis 12 kHz zwischen 0,73 und 0,82. Es ist bekannt, daß man sich die Schallausbreitung in einer solchen Rinne als "Zick-Zack-Reflexion" an den schallweichen Wänden vorstellen kann /9/. Mit dem angegebenen Verhältnis C_F/C_R ergibt sich damit ein Winkel $\varphi = \arccos(C_F/C_R)$ zwischen 35° und 45°, unter dem die Schallwellen am Ende der Rinne auf die Probe treffen (φ ist gegen das Einfallslot gemessen).

Um den Einfallswinkel φ zu verkleinern und den Freifeldbedingungen so nahe wie möglich zu kommen, ist von den üblichen Meßbedingungen einer schallweich umkleideten Rinne folgendermaßen abgewichen worden: Bei fester Frequenz wurde der quadra-

tische Rinnenquerschnitt erhöht. Damit ergab sich zwar ein Gemisch aus der (1,1)-Mode und höheren Moden, doch konnte damit ein günstigeres Verhältnis C_F/C_R erzielt werden. Der störende Einfluß der höheren Moden wird einmal dadurch beseitigt, daß die Rinne mit Hilfe des schallweichen, verschiebbaren Schallsenders auf Resonanz der (1,1)-Mode abgeglichen wurde, wodurch sich zudem der Abstand Nutzsignal - Störsignal verbesserte. Zum anderen wurde das nahezu punktförmige Hydrophon in die geometrische Mitte des Rinnenquerschnitts gesetzt, so daß sich bereits dadurch der Einfluß der Störmoden verminderte.

Mit den gegebenen Abmessungen der Rinne (200 x 34 x 34 cm^3) ergaben sich damit zwischen 6,8 kHz und 15 kHz folgende Meßbedingungen: Das Verhältnis C_F/C_R liegt jetzt zwischen 0,89 und 0,90. Der Einfallswinkel φ beträgt im gesamten Frequenzbereich etwa 25^o, was durch eine Querschnittsänderung der Rinne möglich ist. Dazu wird eine schallweiche, verschiebbare Längswand benutzt und zum anderen die Wasserhöhe entsprechend gewählt. (Bei 6,8 kHz beträgt der Querschnitt 34 x 34 cm^2, bei 15 kHz 15,5 x 15,5 cm^2.) Für die akustische Güte der Rinne spricht die verhältnismäßig hohe Stehwelligkeit von etwa 45 dB bei schallweichem Abschluß. Es wird als Schallsender ein Sell-Wandler benutzt, der die gesamte Querschnittsfläche der Rinne ausfüllt. Die Meßanordnung gestattet, Proben bis zu einer Fläche von 34 x 34 cm^2 auf ihre Eingangsimpedanz hin zu untersuchen.

Um die Zuverlässigkeit der beschriebenen Meßeinrichtung zu prüfen, wurde die Massenimpedanz einer 34 x 34 cm^2 großen und 1,5 cm dicken Messingplatte ermittelt. In Fig. 12 ist der Imaginärteil der berechneten und gemessenen Impedanz $\underline{W}$ über der Frequenz aufgetragen. Es ergab sich gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung. Der Realteil von $\underline{W}$ lag erwartungsgemäß vernachlässigbar niedrig.

Wie erwähnt, wird für jede Frequenz ein bestimmter quadratischer Querschnitt der schallweich umkleideten Rinne gewählt. Mit wachsender Frequenz verringert sich dieser. Das bedeutet, daß bei den höheren Frequenzen eine Wasserschicht in direktem Kontakt mit der Probe ist, die wesentlich geringere Querabmessungen hat als das 34 x 34 cm^2 große Meßobjekt. Das könnte zu Effekten in der Probe senkrecht zur Schalleinfallsrichtung führen, was die Impedanzmessungen stören oder ganz unmöglich machen würde. Die Untersuchung der 1,5 cm starken Messingplatte zeigte jedoch, daß zumindest bei dieser Art von Proben keine derartigen im folgenden als "Quereffekte" bezeichneten Erscheinungen auftreten oder sie innerhalb der Meßungenauigkeit zu finden sind.

Auch bei der Impedanzbestimmung von großflächigen Keil- und Dünnschichtabsorbern wurden solche "Quereffekte" zunächst als vernachlässigbar vorausgesetzt.

4.2. Keilsysteme

Es wurden verschiedene großflächige Keilabsorber im Frequenzbereich von 5,5 kHz bis 14 kHz auf ihre Eingangsimpedanzen hin untersucht. Dabei sind folgende Parameter geändert worden: Form, Länge, Anzahl und Abstände der Keile. Als verlustbehaftetes Material diente dasselbe, das auch beim Herstellen der kleinflächigen Proben Verwendung fand. Fig. 13 zeigt den Aufbau der Probe, die sich im Hinblick auf die später untersuchten Kombinationsabsorber als am günstigsten erwies. Sie ähnelt, übertragen auf die vergrößerte Fläche von 34 x 34 cm^2, der kleinflächigen Probe von Fig. 5, die im Kundtschen Rohr gemessen wurde. Die Schichtdicke der gesamten Anordnung betrug 10,5 cm. Die in der schallweich ausgekleideten Rinne durchgeführte Messung ergab die Impedanzkurve von Fig. 14. Der Reflexionsfaktor im untersuchten

Frequenzbereich betrug etwa 35 bis 50 %. Damit liegt er aus folgenden Gründen verhältnismäßig deutlich über dem des kleinflächigen Keilabsorbers von Fig. 5:

1. Wie erwähnt, beträgt der Schalleinfallswinkel φ bei diesen Messungen etwa 25°. Untersuchungen haben ergeben, daß sich der Reflexionsfaktor von Keilabsorbern mit wachsendem Winkel φ vergrößert /6/.
2. Die erhöhte Phasengeschwindigkeit und somit größere Wellenlänge in der Wasserrinne bedeutet eine Verkürzung der effektiven Keillänge.
3. Bei der Bestimmung der Kurve von Fig. 14 wurde die schallweiche Referenzebene ("Kurzschluß") in Höhe der Keilspitzen des Absorbers gelegt, wodurch man seine Eingangsimpedanz erhält. Natürlich setzt sich diese zum einen aus den Eigenschaften der Keile selbst zusammen. Zum anderen muß man die 10,5 cm dicke Wasserschicht vom Keilende bis zu den Keilspitzen als akustische Leitung betrachten, deren Ausbreitungs- und Übertragungseigenschaften mit die Eingangsimpedanz in der Ebene der Keilspitzen bestimmen. Diese Ausbreitungsbedingungen in der Rinne unterscheiden sich jedoch von denen des Freifeldes. Damit müssen sich zwischen der in der schallweich ausgekleideten Rinne und der im Kundtschen Rohr (Freifeldbedingungen) bestimmten Eingangsimpedanz Abweichungen ergeben.

Zu erwähnen ist, daß alle Meßobjekte, sowohl die kleinflächigen als auch die großflächigen, rückseitig schallweich abgeschlossen wurden. Damit erhält man eine definierte Abschlußimpedanz aller Proben und den Vorteil einer guten Vergleichsmöglichkeit aller Messungen. Allerdings müssen damit Rückwandreflexionen in Kauf genommen werden, die auch den verhältnismäßig hohen Reflexionsfaktor der Keilabsorber in Fig. 5 und Fig. 11 erklären.

Eine deutliche Verbesserung der Absorptionseigenschaften ergab sich durch Verlängerung der Keile. Das ist aber aus den genannten Gründen im Rahmen dieser Arbeit nicht anzustreben.

Nicht nur der Reflexionsfaktor der Keilabsorber hängt vom Einfallswinkel φ ab, wie eine Untersuchung ergab. In Fig. 15 zeigt Abb. (a) die Impedanzkurve eines großflächigen Keilsystems, das bis auf eine geringere Keildichte ähnlich wie in Fig. 13 aufgebaut war. Der Einfallswinkel φ betrug bei dieser in der Rinne durchgeführten Messung etwa 45°. Die Impedanzmessung der gleichen Probe unter einem Einfallswinkel von $\varphi = 25^{\circ}$ ergab die Kurve von Abb. (b). Im Kundtschen Rohr liegt senkrechte Schalleinfallsrichtung vor, d.h. es gilt $\varphi = 0^{\circ}$. Abb. (c) zeigt die in diesem Rohr durchgeführte Messung einer kleinflächigen Probe, deren Aufbau dem in Abb. (a) und (b) untersuchten Keilabsorber entsprach. Bei allen 3 Messungen lag die gleiche Keillänge vor. Vergleicht man die 3 Ergebnisse, so stellt man folgende Gesetzmäßigkeit fest: Mit wachsendem Einfallswinkel verschiebt sich die Resonanzfrequenz f_o der Keile zu höheren Werten. Das ist dadurch zu erklären, daß mit steigendem Winkel φ die effektiv wirksame Keillänge verringert wird.

4.3. Dünnschichtige Resonanzabsorber

Der Aufbau der großflächigen, ölgedämpften Zweikreisresonanzabsorber entspricht dem der kleinflächigen Proben, wie in Abschnitt 3.2.1. beschrieben. In definiertem Abstand vor einer 34 x 34 cm^2 großen Rückmasse (Messingplatte) befinden sich 10 zylinderförmige, zueinander parallel verlaufende Siebkörper mit einer Länge von je 30 cm. Dabei war folgendes zu beachten: Der reelle Strömungswiderstand R der Siebkörperanordnung hängt unter anderem vom Verhältnis der Gesamtfläche

F_g des Absorbers zur Oberfläche F_a der Schlitzsiebe ab (vergl. Gl. (4)). Wie in Abschnitt 4.1. erwähnt, wird bei jeder Frequenz mit einem anderen Rinnenquerschnitt gearbeitet, so daß sich im Verlauf einer Probenmessung ständig die Fläche F_g ändert. Um den Strömungswiderstand R im gesamten Frequenzbereich konstant zu halten, mußte für jeden gewählten Rinnenquerschnitt dasselbe Verhältnis F_g/F_a erreicht werden. Dies gelang durch geeignete Verteilung der Siebkörper über die Probenfläche.

Als biegeweiche Frontplatte diente eine 3 mm starke Membran aus "Adipren"-Material, das den akustischen Eigenschaften von Wasser sehr gut angepaßt ist. Die Rückmasse und die Frontplatte wurden an einem geeigneten 34 cm x 34 cm großen Metallrahmen angebracht. Als luftblasenfreie Füllflüssigkeit dienten etwa 2 Liter Silikonöl definierter Viskosität. Die schallweiche Referenzebene ("Kurzschluß") wurde bei allen Messungen in Höhe der Siebkörper gelegt, so daß die Messungen die Eingangsimpedanz $\underline{W}_2$ der Dünnschichtabsorber ergaben.

Fig. 16 zeigt die Impedanzkurve einer großflächigen Probe. Bis auf die Stärke der Rückmasse und die Schlitzbreite am Strömungssieb glichen alle Daten dieses Absorbers denen des kleinflächigen von Fig. 11:

1. Abstand Rückmasse - Siebkörper 6,5 mm;
2. Viskosität des Silikonöles 1000 cSt.;
3. Schlitzbreite am Strömungssieb 0,140 mm;
4. Rückmasse 4 mm.

Es sind deutliche Unterschiede zwischen beiden Ergebnissen festzustellen. (Mit einer Rückmasse von 9 mm und einer Schlitzbreite von 0,102 mm, die bei der kleinflächigen Probe verwendet wurden, ergäbe sich eine noch größere Abweichung.) Vor allem bei den höheren Frequenzen fällt gegenüber der Impedanzkurve von Fig. 11 eine Verschiebung zu niedrigeren Imaginärteilen auf. Der Grund dafür wird später gezeigt.

Die optimale Abstimmung der großflächigen Zweikreisresonanzabsorber erwies sich, wie im folgenden gezeigt wird, als wesentlich schwieriger als bei den kleinflächigen Proben (Abschnitt 3.2.2.).

Die Impedanzwerte zwischen 6,8 kHz und 14 kHz (Fig. 16) scheinen auf einer großen Schleife unterhalb der reellen Achse zu liegen. Das bedeutet, der mechanische Serienkreis, der sich aus der Rückmasse und der Nachgiebigkeit der Ölschicht zwischen Rückmasse und Siebkörper zusammensetzt, ist gegenüber dem mechanischen Parallelkreis zu tief abgestimmt. Daher wurde durch Verringerung des Abstandes Siebkörper - Rückmasse auf 3 mm die Nachgiebigkeit der Ölschicht verringert. Erwartungsgemäß hat sich die Impedanzkurve der geänderten Probe (Fig. 17) zu höheren Imaginärteilen verschoben. Auffallend ist, daß sie annähernd zu einer Geraden entartet, was folgendermaßen zu erklären ist: Soll die Impedanzkurve eines Zweikreisresonanzsystems in der Nähe der reellen Achse eine Schleife oder eine mehr oder weniger starke Krümmung beschreiben, so müssen die Resonanzfrequenzen beider Kreise übereinstimmen, und es muß Ungl. (3) gelten (vergl. Abschnitt 3.2.1.). Vermutlich sind beide Bedingungen oder eine von beiden nicht erfüllt.

Um vor allem bei höheren Frequenzen die Impedanzkurve von Fig. 17 weiter zu positiven Imaginärteilen zu verschieben und somit die Absorptionsbandbreite zu vergrößern, wurde der mechanische Serienkreis noch einmal durch Verringerung der Rückmasse von 4 mm auf 2 mm höher abgestimmt. Dieser Schritt erwies sich jedoch als falsch, wie Fig. 18 zeigt. Gegenüber der Impedanzkurve von Fig. 17 haben sich die Abstände zwischen den Werten für die einzelnen Frequenzen vergrößert. Das läßt auf eine schlechtere Übereinstimmung der Resonanzfrequenzen beider Kreise schließen. Eine weitere Abstimmungserhöhung des mechanischen Serienkreises führt

also bei konstant gehaltenem Parallelkreis auf keinen Fall zur Optimierung des Zweikreisresonanzabsorbers. Aus diesem Grund wurde die Eigenfrequenz des Serienkreises durch Vergrößerung des Abstandes Siebkörper - Rückmasse von 3 mm auf 6 mm wieder erniedrigt. Fig. 19 zeigt die Impedanzkurve der geänderten Probe, deren Rückmassenstärke 2 mm betrug. Der Verlauf ähnelt dem in Fig. 17 dargestellten Ergebnis. Das ist zu erwarten gewesen, da die Resonanzfrequenz des mechanischen Serienkreises in beiden Fällen die gleiche sein sollte.

Um die größte, theoretisch erreichbare Absorptionsbandbreite zu erhalten, muß die Impedanzkurve eine Schleife beschreiben, die annähernd auf dem 10 %-Kreis liegt /3/. Die Fläche innerhalb dieser Schleife wird durch Ungl. (3) ($L_1 > C_2R^2$) bestimmt. Die Größe der Daten L_1 (Ölmasse, die durch das Schlitzsieb oszilliert), C_2 (Nachgiebigkeit der Ölschicht zwischen Siebkörper und Rückmasse) und R (reeller Strömungswiderstand des Schlitzsiebes) sind bei der Probe von Fig. 19 vermutlich ungünstig gewählt, so daß sich nur eine schwache Krümmung der Impedanzkurve ergibt. Es erwies sich als richtig, die in Ungl. (3) linear eingehende Größe C_2 zu erhöhen. Dazu wurde der Abstand Siebkörper - Rückmasse von 6 mm auf zunächst 10 mm vergrößert. Wie Fig. 20 zeigt, hat sich dadurch eine Schleife außerhalb des 10 %-Kreises gebildet. Um sie in den 10 %-Kreis zu verschieben, müssen Real- und Imaginärteil der gemessenen Impedanzkurve erhöht werden. Zunächst wurde die Schlitzbreite d des zylinderförmigen Strömungssiebes von 0,140 mm auf 0,129 mm (im Mittel) verkleinert (vergl. Gl. (4)). Es ergab sich jedoch nur bei den tiefen Frequenzen eine geringe Realteilerhöhung, wie die Impedanzkurve der geänderten Probe zeigt (Fig. 21). Die Fläche innerhalb der Schleife wurde verringert, was durch die Erhöhung der quadratisch eingehenden Größe R in Ungl. (3) zu erklären ist. Außerdem hat sich mit Verkleinerung

der Schlitzbreite vermutlich die Ölmasse (L_1) reduziert, wodurch ebenfalls Bed. (3) schwächer erfüllt wurde.

Der Schritt, die Viskosität des verwendeten Silikonöles von 1000 cSt. auf 1280 cSt. zu erhöhen, erwies sich ebenfalls als nicht geeignet. Wie Fig. 22 zeigt, ergab sich keine Verschiebung der Impedanzkurve zu größeren Realteilen. Das ist auf die nicht-Newtonschen Eigenschaften hochviskoser Flüssigkeiten zurückzuführen. Es ist gezeigt worden, daß man mit Viskositäten ab etwa 1000 cSt. bei Silikonölen keine nennenswerte Erhöhung des reellen Strömungswiderstandes R mehr erhält /3/. Daher wurde für die folgenden Untersuchungen wieder Silikonöl der Viskosität μ = 1000 cSt. verwendet.

Wie sich im folgenden zeigen wird, kann durch Änderung eines anderen Parameters eine Erhöhung des Realteiles erreicht werden.

Die Schleife der Impedanzkurve von Fig. 21 liegt unterhalb der reellen Achse. Das heißt, der mechanische Serienkreis ist gegenüber dem Parallelkreis zu tief abgestimmt. Um die Resonanzfrequenz des Serienkreises zu erhöhen, wurde die Nachgiebigkeit der Ölschicht (C_2) durch Verringerung des Abstandes Siebkörper - Rückmasse von 10 mm auf 7,5 mm verkleinert. Was den Imaginärteil der erhaltenen Impedanzkurve (Fig. 23) betrifft, so hat sich gegenüber dem Ergebnis von Fig. 21 keine wesentliche Änderung ergeben. Der Realteil jedoch wurde erhöht, was folgendermaßen zu erklären ist: Im elektrischen Ersatzschaltbild der ölgedämpften Zweikreisresonanzabsorber (Fig. 7) wird der mechanische Serienkreis näherungsweise als verlustfrei vorausgesetzt. Vermutlich wird dieser Kreis jedoch schwach gedämpft, hervorgerufen durch mechanische Verluste der Ölschicht zwischen Siebkörper und Rückmasse. Berücksichtigt man das im elektrischen Ersatz-

schaltbild, so liegt ein ohmscher Widerstand R_2 in Serie mit C_2 (vergl. Fig. 7). R_2 ist groß gegen den Widerstand R, der die reellen Reibungsverluste des mechanischen Parallelkreises repräsentiert. Mit zunehmender Dämpfung des mechanischen Serienkreises wird R_2 kleiner und macht sich gegenüber R stärker bemerkbar. Damit bestimmt R_2 den Realteil der gemessenen Impedanzkurven mit. Die Verringerung der Ölschicht von 10 mm auf 7,5 mm bedeutete eine Verminderung der mechanischen Verluste im Serienkreis, so daß sich die erwähnte Realteilerhöhung von Fig. 23 ergab. Die gezeigte Abhängigkeit des Realteiles konnte bei allen anderen entsprechenden Messungen festgestellt werden (Vergl. Fig. 16 mit Fig. 17; Fig. 18 mit Fig. 19; Fig. 19 mit Fig. 20).

Zu erwähnen ist, daß der Meßbereich zu den tiefen Frequenzen hin auf 4,5 kHz erweitert wurde. Das bedeutet zwar eine schrägere Schalleinfallsrichtung (vergl. Abschnitt 4.1.), doch erwiesen sich die akustischen Eigenschaften der Dünnschichtabsorber als fast unabhängig davon.

Den mechanischen Serienkreis höher abzustimmen, führte also nicht zum Ziel, die Eigenfrequenzen beider Resonanzkreise aneinander anzugleichen und damit die Schleife in Fig. 21 auf die reelle Achse der Impedanzebene zu verschieben. Die Resonanzfrequenz des mechanischen Parallelkreises zu erniedrigen und dadurch die Absorptionseigenschaften zu verbessern, war ohne weiteres nicht möglich, wie die folgende Untersuchung zeigte. Dazu wurde die Nachgiebigkeit des luftgefüllten Gummischlauches innerhalb der zylinderförmigen Siebkörper durch Verwendung eines weicheren Materials erhöht. Die erwartete Verschiebung der Schleife konnte nicht festgestellt werden, wie Fig. 24 zeigt. Das bedeutet, daß sich nach wie vor die Eigenfrequenzen des Serien- und Parallelkreises stark voneinander unterscheiden. Das wird bestätigt durch:

a) die Resonanzfrequenz f_{os} des mechanischen Serienkreises, bestehend aus einer Ölschicht von 7,5 mm Dicke und einer Rückmassenstärke von 2 mm, berechnet sich zu $f_{os} \approx$ 9,3 kHz.

b) die Resonanzfrequenz f_{op} des mechanischen Parallelkreises ergibt sich aus den Frequenzen f_1 und f_2, bei denen sich die Impedanzkurve überschneidet /4/ zu $f_{op} = \sqrt{f_1 \cdot f_2}$. Danach erhält man aus Fig. 23 $f_{op} \approx \sqrt{11,1 \cdot 14,7}$ kHz $\approx$ 12,8 kHz.

Ein Vergleich mit den Impedanzkurven kleinflächiger Resonanzabsorber zeigt, daß die Eigenfrequenz des mechanischen Parallelkreises bei den großflächigen Proben zu hoch liegt. Das verursacht die Abweichungen zwischen den Ergebnissen beider Untersuchungen. Wie die vorliegenden Messungen gezeigt haben, kann der Grund für die Fehlabstimmung des Parallelkreises nur an einer verringerten Ölmasse (L_1) liegen, die durch das Schlitzsieb der großflächigen Dünnschichtabsorber oszilliert. Eine mögliche Ursache dafür ist ein Mitschwingen der Strömungssiebe. Das kann aber ausgeschlossen werden, da eine geeignete, starre Befestigung der zylinderförmigen Siebkörper keine Verbesserung der Absorptionseigenschaften ergab.

Aus diesem Grund kommen als Erklärung nur "Quereffekte" in der Probe (vergl. Abschnitt 4.1.) in Frage, die zunächst als vernachlässigbar vorausgesetzt waren. Das Schalldruckprofil über das großflächige Meßobjekt verläuft in der schallweich umkleideten Rinne cosinusförmig mit einem Maximum im Zentrum und Null am Rand. Das verursacht vermutlich eine Bewegung der Absorberoberfläche, die eine radiale Wechselströmung des Öles senkrecht zur Schalleinfallsrichtung bewirkt. Damit ist eine Verringerung der Ölmasse (L_1) verbunden, die durch die Schlitze der Strömungssiebe gezwungen werden soll. (Derartige Querströmungen in der großflächigen Probe können auch im Freifeld bei Schalleinfall nicht-ebener Wellen oder bei schrägem Auftreffwinkel auftreten.)

Um das Entstehen der beschriebenen Querströmungen weitgehend zu verhindern, wurde die großflächige Anordnung des Dünnschichtabsorbers kassettenähnlich in 49 "Zellen" der Größe 4,3 cm x 4,3 cm aufgeteilt. Als gegenseitige Begrenzung dieser so entstandenen Zellen dienten 3 mm starke Messingstreifen, die mit der Rückmasse fest verklebt wurden. Die 30 cm langen Siebkörper wurden durch gerade passende Bohrungen in den Messingstreifen geführt. Die mit der gesamten Anordnung fest verschraubte "Adipren"-Frontplatte dichtete alle 49 Zellen nach vorn ab.

Die physikalischen Daten einer so aufgebauten Probe betrugen:

1. Stärke der Rückmasse 4 mm;
2. Abstand Siebkörper - Rückmasse 7 mm;
3. Viskosität des Silikonöles 1000 cSt.;
4. Bei der Wahl der Schlitzbreite d am Siebkörper wurde von dem Wert der kleinflächigen Probe in Fig. 11 ausgegangen. Es mußte außerdem die aus praktischen Gründen durchgeführte Erhöhung der Siebkörperanzahl von 10 auf 13 berücksichtigt werden (Gl. (4)). Damit betrug die Schlitzbreite 0,086 mm.

Die Impedanzkurve dieser kassettenähnlich aufgebauten Probe zeigt Fig. 25. Daraus ergibt sich eine Resonanzfrequenz f_{op} des mechanischen Parallelkreises zu $f_{op} \approx \sqrt{9,6 \cdot 5,5}$ kHz $\approx 7,3$ kHz. Diese gegenüber früheren Messungen wesentlich tiefere Abstimmung kann nur in einer Vergrößerung der Ölmasse (L_1) ihre Ursache haben. Damit wird durch die abgeänderte, kassettenähnliche Anordnung des großflächigen Absorbers die Existenz der vermuteten Querströmungen früher aufgebauter Proben bestätigt. Fig. 16 zeigt die Impedanzkurve eines früher untersuchten Dünnschichtabsorbers ohne die beschriebene Aufteilung in Zellen-Elemente. Die physikalischen Daten dieser Probe stimmen bis auf die Schlitzbreite am Strömungssieb mit denen

der von Fig. 25 überein. Ein Vergleich beider Ergebnisse zeigt eine deutliche Verbesserung, verursacht durch den abgeänderten Aufbau . Wie erwähnt, beträgt jetzt die Eigenfrequenz f_{op} des mechanischen Parallelkreises 7,3 kHz (vergl. Fig. 25). Der mechanische Serienkreis müßte etwas niedriger abgestimmt sein, da der Kreuzungspunkt der Schleife (Fig. 25) geringfügig unterhalb der reellen Achse liegt. Das bestätigt eine Rechnung. Danach beträgt die Resonanzfrequenz f_{os} des mechanischen Serienkreises 6,7 kHz. Damit ist gegenüber früheren Messungen (Fig. 23, Fig. 24) fast Übereinstimmung beider Resonanzfrequenzen und daher eine deutliche Verbesserung der Impedanzkurve erreicht worden.

5. Kombinierte Absorber

Für die Entwicklung einer breitbandig wirksamen großflächigen Keil-Resonanz-Absorberkombination wurde die Keilanordnung von Fig. 13 verwendet, deren Impedanzkurve Fig. 14 zeigt. Die akustischen Eigenschaften dieser Probe, $\underline{Z}_1$ und $\underline{Z}_2$ (vergl. Fig. 1), wurden als gegeben vorausgesetzt. Es galt, experimentell den günstigsten Zweikreisresonanzabsorber rückseitig an die Keilprobe akustisch anzupassen. Die in der Wasserrinne durchgeführten Messungen ergaben dabei, daß die Absorptionseigenschaften der Kombination nicht davon abhingen, von welcher Art die mechanische Verbindung beider großflächiger Absorbertypen war.

Legt man zur Impedanzbestimmung der kombinierten Probe die schallweiche Referenzebene ("Kurzschluß") in die Höhe der Keilspitzen (Ebene 1 in Fig. 1), so erhält man ihre Eingangsimpedanz. Wie in Abschnitt 2 beschrieben, transformiert das inhomogene Leitungsstück der Keilanordnung den Eingangswiderstand $\underline{W}_2$ des Dünnschichtabsorbers in diese Eingangsebene 1 der gesamten Kombination (Vergl. Fig. 1). Neben den Eigenschaften der Keile selbst gehen bei dieser Impedanztransformation auch die Ausbreitungseigenschaften der schallweich ausgekleideten Rinne ein. Diese unterscheiden sich jedoch von denen des Freifeldes. Damit ergäbe diese Art der Bestimmung nicht die Eingangsimpedanz der untersuchten Absorberkombination, die im Freifeld zu erwarten wäre. Aus diesem Grund wurde folgendermaßen vorgegangen: Wie bei der Bestimmung der Eingangsimpedanz der Dünnschichtabsorber wurde die schallweiche Referenzebene zur Untersuchung der kombinierten Proben in die Höhe der Siebkörper gelegt. Damit ergab sich eine neue Eingangsimpedanz $\underline{W}_2'$ des Dünnschichtabsorbers, bedingt durch die akustischen Eigenschaften der davorgesetzten Keilanordnung. Anschließend wurde $\underline{W}_2'$ unter den Ausbreitungsbedingungen des Freifeldes in die Eingangsebene 1

(vergl. Fig. 1) transformiert (Smith-Diagramm). Die sich daraus ergebende Impedanz stellt näherungsweise den komplexen Eingangswiderstand $\underline{W}_1$ der gesamten Absorberanordnung dar, der im Freifeld zu erwarten ist.

Kurve (a) in Fig. 26 zeigt noch einmal die Eingangsimpedanz $\underline{W}_2$ des dünnschichtigen Zweikreisresonanzabsorbers mit den Daten: Stärke der Rückmasse 2 mm, Abstand Siebkörper - Rückmasse 7,5 mm, Viskosität des Silikonöles 1000 cSt. (gilt für alle im folgenden verwendeten Dünnschichtabsorber), Schlitzbreite d = 0,129 mm. Kurve (b) stellt im gleichen Frequenzbereich die Impedanz $\underline{W}'_2$, d.h. den Eingangswiderstand dieses Resonanzabsorbers bei davorgesetzter Keilprobe (Fig. 13) dar. Ein Vergleich beider Kurven zeigt die deutliche, durch die Kombination hervorgerufene Absorptionsverbesserung. Führt man die erwähnte Widerstandstransformation durch, so ergibt sich die Eingangsimpedanz $\underline{W}_1$ im Freifeld (Fig. 27). Bei den tiefen Frequenzen liegt der Amplitudenreflexionsfaktor zu hoch, was durch die schlechten Absorptionseigenschaften des Zweikreisresonanzabsorbers in diesem Bereich zu erklären ist. Ab etwa 6,6 kHz beträgt die Reflexion der Dünnschichtprobe selbst weniger als 10 %. Der im folgenden mit K_1 bezeichnete kombinierte Absorber unterschreitet diesen Reflexionsfaktor erst ab etwa 7,2 kHz. Das ist auf ungenügende akustische Transparenz des Keilabsorbers in diesem Frequenzbereich zurückzuführen. Das Absorptionsband (Frequenzbereich, in dem der Amplitudenreflexionsfaktor 10 % nicht überschreitet) liegt zwischen 7 und 13 kHz (Fig. 28).

Kurve (a) in Fig. 29 ist die Impedanzkurve eines Zweikreisresonanzabsorbers mit den Daten: Stärke der Rückmasse 2 mm, Abstand Siebkörper - Rückmasse 10 mm, Schlitzbreite am Strömungssieb 0,129 mm. Kurve (b) gibt den Impedanzverlauf $\underline{W}'_2$ der aus dieser Dünnschichtprobe und dem Keilabsorber von Fig. 13 zusammengesetzten Kombination wieder. Die im Freifeld

zu erwartende Eingangsimpedanz $\underline{W}_1$ dieser Kombination K_2 (Fig. 30) zeigt gegenüber der von K_1 keine wesentlichen Unterschiede, was durch ähnlichen Verlauf der zugehörigen Dünnschichtabsorber zu erklären ist. Die verhältnismäßig kleine Absorptionsbandbreite beider Kombinationen ist im Bereich der hohen Frequenzen auf schlechte akustische Anpassung innerhalb der zusammengesetzten Probe und bei den tiefen Frequenzen auf ungenügende Absorption des Resonanzabsorbers zurückzuführen.

Der kassettenähnlich aufgebaute Zweikreisresonanzabsorber (vergl. Abschnitt 4.3.) zeigt bei den tiefen Frequenzen günstigere Eigenschaften (Kurve (a) von Fig. 32). Seine Kombination mit der erwähnten Keilanordnung läßt daher einen besseren Verlauf der Impedanz $\underline{W}_2'$ erwarten, was Kurve (b) in Fig. 32 bestätigt. Die deutliche Absorptionsverbesserung (Fig. 34) gegenüber den Proben K_1 und K_2 ist außerdem auf die günstige Lage der Schleife von Kurve (a) zurückzuführen. Den Eingangswiderstand im Freifeld zeigt Fig. 33 zwischen 4,5 und 17,0 kHz. Daraus geht hervor, daß mehrere Schleifen den Punkt $\underline{W}_1 = \varrho c$ der komplexen Impedanzebene umlaufen. Die untersuchten Absorberkombinationen stellen die Kopplung eines Zweikreisresonanzsystems (Dünnschichtprobe) mit der Anordnung der Keile dar, die ebenfalls eine definierte Eigenfrequenz besitzt (vergl. Fig. 14). Die drei Resonanzfrequenzen der Einzelabsorber liegen zwischen 6,6 kHz und etwa 10 kHz und damit verhältnismäßig eng zusammen, wodurch auch die Schleifen in der Impedanzkurve der Absorberkombination so dicht zusammenrücken.

Die im Rahmen dieser Messungen optimale Keil-Dünnschicht-Absorberkombination setzt sich aus der großflächigen Keilprobe von Fig. 13 und einem Zweikreisresonanzabsorber zusammen, dessen Daten betrugen: Rückmasse 2 mm, Abstand Siebkörper - Rückmasse 10 mm, Schlitzbreite am zylinderför-

migen Strömungssieb 0,140 mm. Den Impedanzverlauf $\underline{W}_2$ dieses Resonanzabsorbers selbst zeigt Kurve (a) in Fig. 35. Die wesentlich besseren Absorptionseigenschaften der kombinierten Probe gehen aus Kurve (b) (Impedanz $\underline{W}_2'$) hervor. Führt man die erwähnte Widerstandstransformation durch, so erhält man aus $\underline{W}_2'$ die Eingangsimpedanz $\underline{W}_1$ dieses Breitbandabsorbers im Freifeld (Fig. 36). Im Gegensatz zu allen anderen kombinierten Proben liegt der Amplitudenreflexionsfaktor im gesamten Frequenzbereich ab etwa 5,5 kHz (untere Grenzfrequenz) unter 10 % (Fig. 37). Das ist auf ausreichende Absorption der Dünnschichtprobe bei den tiefen Frequenzen, auf akustische Anpassung beider Absorbertypen und darauf zurückzuführen, daß im Bereich der hohen Frequenzen die Keilprobe (Fig. 13) die Dämpfung der einfallenden Schallwellen übernimmt. Dieses so angestrebte Verhalten ist Fig. 39 zu entnehmen, wo über der Frequenz der Reflexionsfaktor der Keilprobe (a), des dünnschichtigen Zweikreisresonanzabsorbers (b) und der Kombination (c) aufgetragen ist. Fig. 38 zeigt, daß man die Absorptionseigenschaften einer Keilanordnung durch rückseitigen Abschluß mit ölgedämpften Zweikreisresonanzabsorbern ganz wesentlich verbessern kann: Kurve (a) gibt den Verlauf des Keilabsorbers selbst, Kurve (b) den des kombinierten Absorbers wieder (vergl. dazu auch Kurve (a) mit (c) in Fig. 39).

Die Grenzfrequenz der untersuchten Keil-Dünnschicht-Kombination mit einer Gesamtschichtdicke von 13,5 cm liegt bei 5,5 kHz. Bei einem Keilabsorber der gleichen Schichtdicke betrüge sie etwa 10 kHz. Um die Grenzfrequenz von 5,5 kHz mit einer Keilprobe zu erreichen, müßte ihre Schichtdicke im Vergleich zur entwickelten Keil-Resonanz-Absorberkombination auf etwa das Doppelte erhöht werden.

Will man die Grenzfrequenz des beschriebenen kombinierten Absorbers noch tiefer legen, so müßte die Absorptionsbandbreite des rückseitig angeordneten Resonanzabsorbers weiter

in den Bereich tiefer Frequenzen verschoben werden. In diesem Fall hätte die Keilanordnung schon bei niedrigeren Frequenzen die Dämpfung der einfallenden Schallwellen zu übernehmen. Das ist aber nur mit einer Verlängerung der Keile und damit Erhöhung der Schichtdicke zu erreichen, was aus Gründen der Material- und Raumeinsparung bei manchen Anwendungen jedoch nicht angestrebt wird.

Herr Prof. Dr. Erwin Meyer hat diese Untersuchung noch kurz vor seinem Tod angeregt und ihr entscheidende Impulse gegeben.
Herrn Prof. Dr. M.R. Schroeder und Herrn Dr. D. Guicking danke ich für ihr förderndes Interesse.
Die Arbeit wurde im Rahmen eines Forschungsvertrages mit dem Department of Physical Research (Naval), M.O.D., London, durchgeführt.

Literatur

/1/ Meyer, E. und Oberst, H.; Resonanzabsorber für Wasserschall,
Acustica 2 (1952), AB 149-AB 170.

/2/ Meyer, E., Brendel, K. und Richter, J.; Absorption von Wasserschall durch erzwungene Wechselströmung von zähen Flüssigkeiten,
Acustica 19 (1967/68), 8-20.

/3/ Brendel, K. und Leuschner, H.-W.; Wasserschall-Resonanzabsorber mit Reibungsverlusten in Flüssigkeitsschichten,
Acustica 21 (1969), 260-268.

/4/ Brendel, K. und Hinsch, K.; Wasserschall-Resonanzabsorber mit Relaxationsverlusten in Hochpolymeren,
Acustica 21 (1969), 189-198.

/5/ Leuschner, H.-W.; Ölgedämpfter Resonanzabsorber für Wasserschall,
Acustica 25 (1971), 280-288.

/6/ Meyer, E., Schilz, W. und Tamm, K.; Über den Bau eines reflexionsfreien Wasserschall-Meßbeckens,
Acustica 10 (1960), 281-287.

/7/ Kurtze, G.; Untersuchungen zur Verbesserung der Auskleidung schallgedämpfter Räume,
Acustica 2 (1952), AB 104-AB 107.

/8/ Meyer, E. und Tamm, K.; Breitbandabsorber für Flüssigkeitsschall,
Acustica 2 (1952), AB 91-AB 104.

/9/ Meyer, E. und Neumann, E.-G.; Physikalische und Technische Akustik. Fr. Vieweg & Sohn, Braunschweig, 2. Aufl. 1974, S. 62, 63.

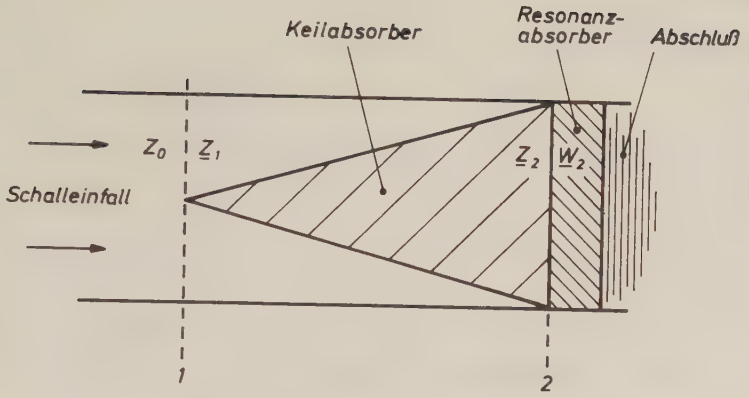

Fig. 1: Schematische Anordnung der Keil-Resonanz-Absorberkombination

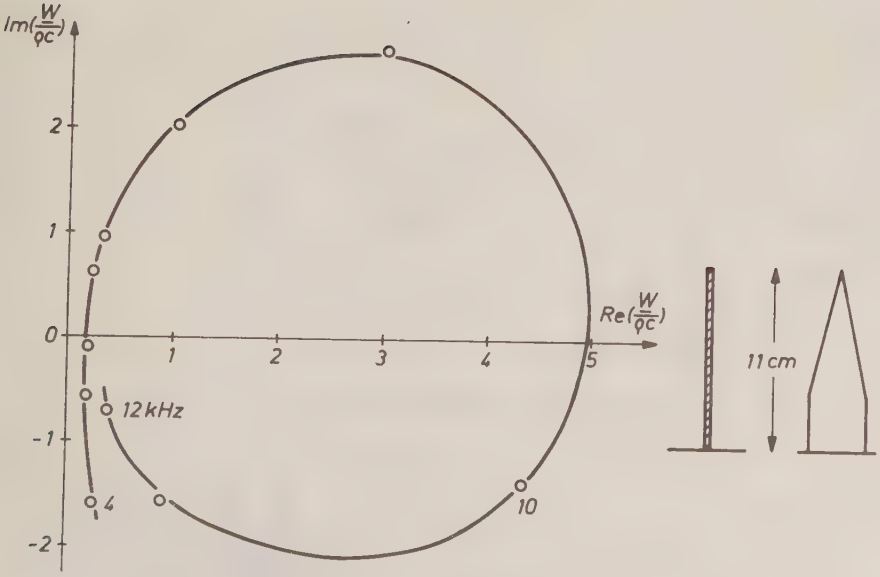

Fig. 2: Impedanzkurve einer Keilprobe

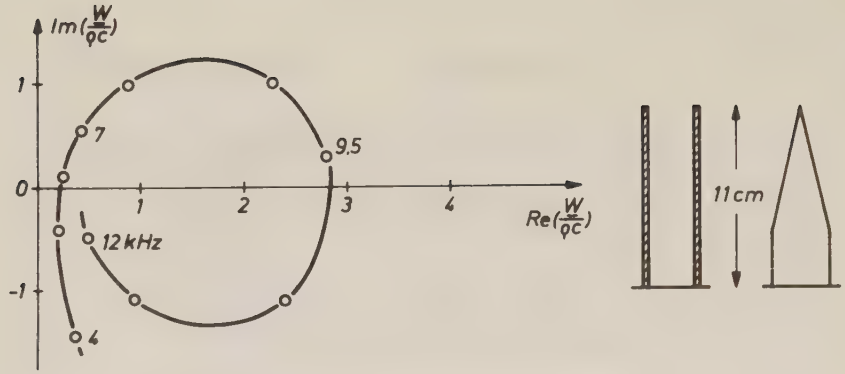

Fig. 3: Impedanzkurve einer Keilprobe

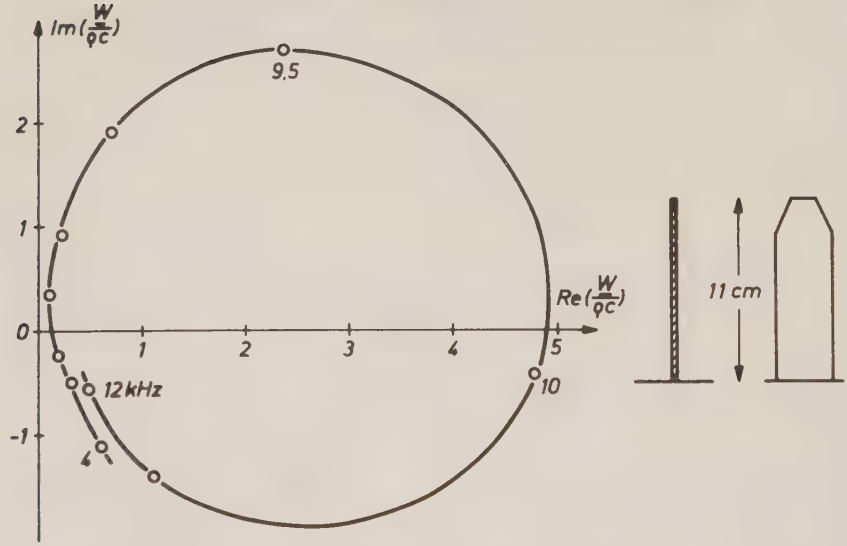

Fig. 4: Impedanzkurve einer Keilprobe

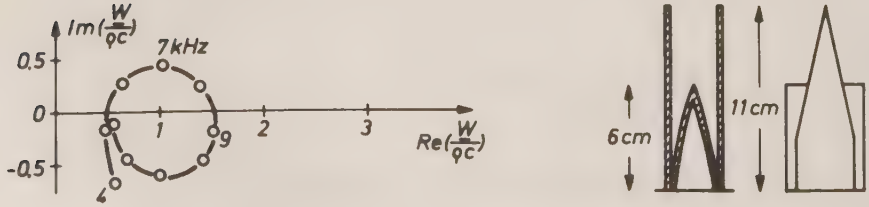

Fig. 5: Impedanzkurve einer Keilprobe

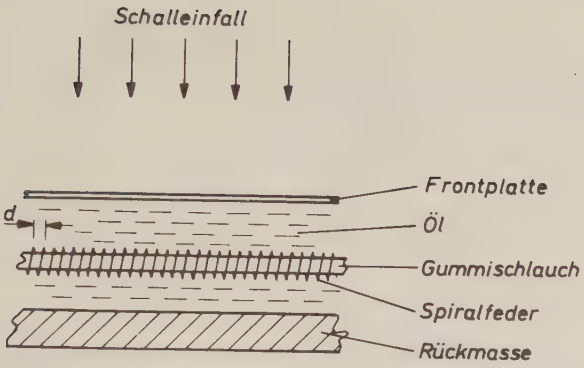

Fig. 6: Aufbau der Zweikreisresonanzabsorber

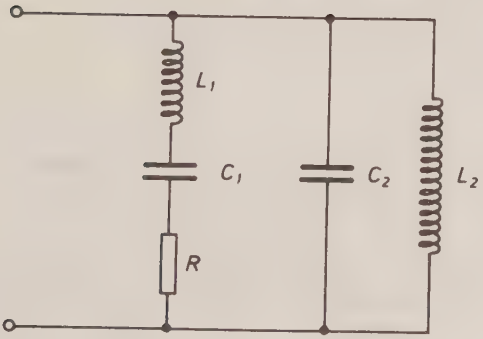

Fig. 7: Elektrisches Ersatzschaltbild der Zweikreis-
resonanzabsorber

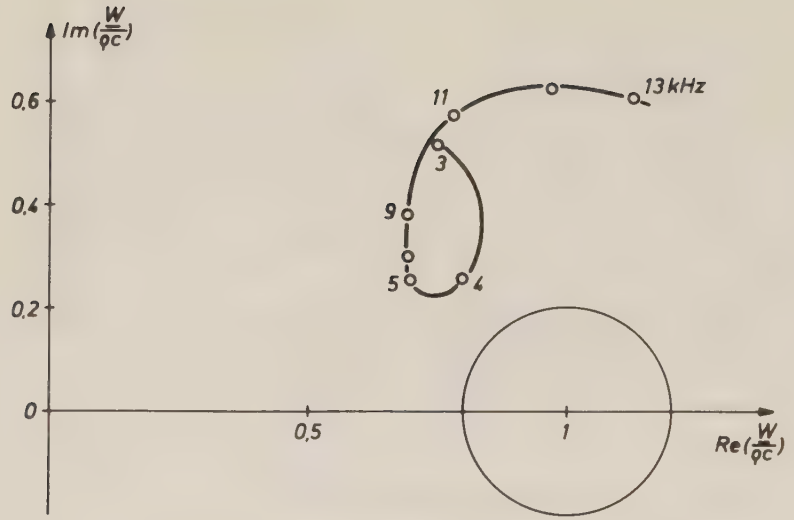

Fig. 8: Impedanzkurve eines Zweikreisresonanzabsorbers:
Rückmasse 7,5 mm,
Abstand Siebkörper - Rückmasse 4 mm,
μ = 1000 cSt.,
Schlitzbreite 0,140 mm.

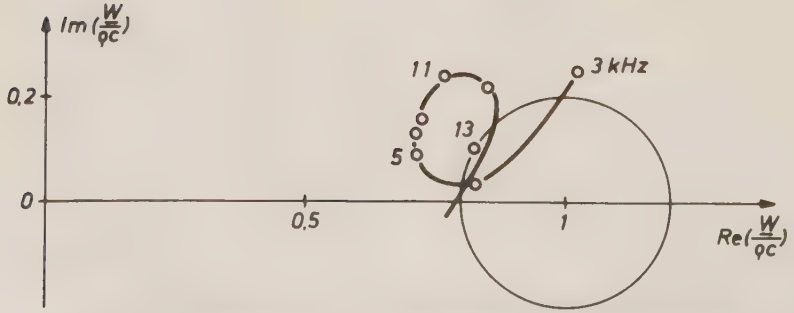

Fig. 9: Impedanzkurve eines Zweikreisresonanzabsorbers:
Rückmasse 12 mm,
Abstand Siebkörper - Rückmasse 6 mm,
μ = 1000 cSt.,
Schlitzbreite 0,140 mm.

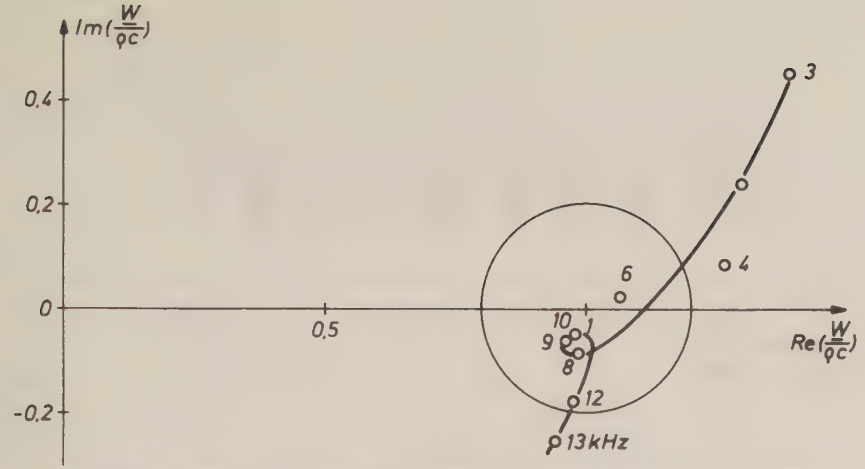

Fig. 10: Impedanzkurve eines Zweikreisresonanzabsorbers:
Rückmasse 12 mm,
Abstand Siebkörper - Rückmasse 6 mm,
μ = 1000 cSt.,
Schlitzbreite 0,102 mm.

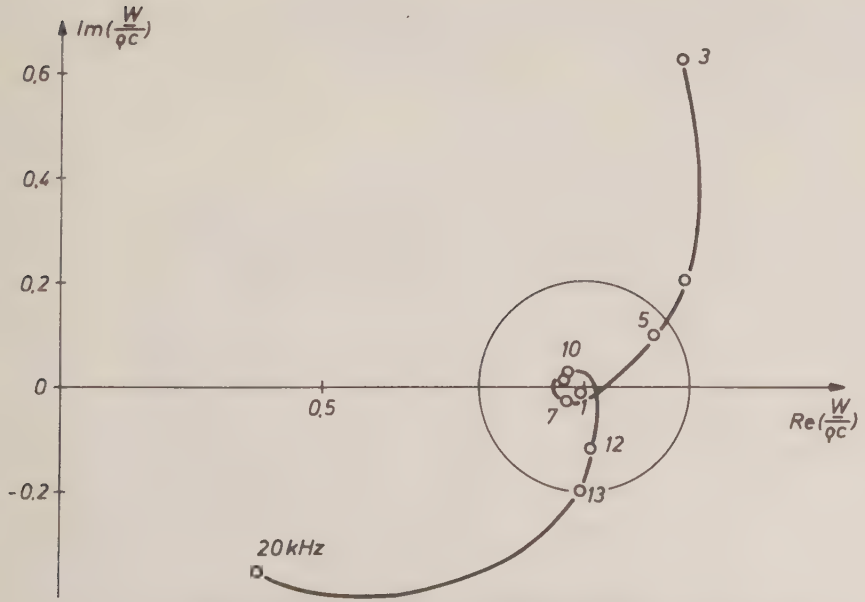

Fig. 11: Impedanzkurve eines Zweikreisresonanzabsorbers:
Rückmasse 9 mm,
Abstand Siebkörper - Rückmasse 6 mm,
μ = 1000 cSt.,
Schlitzbreite 0,102 mm.

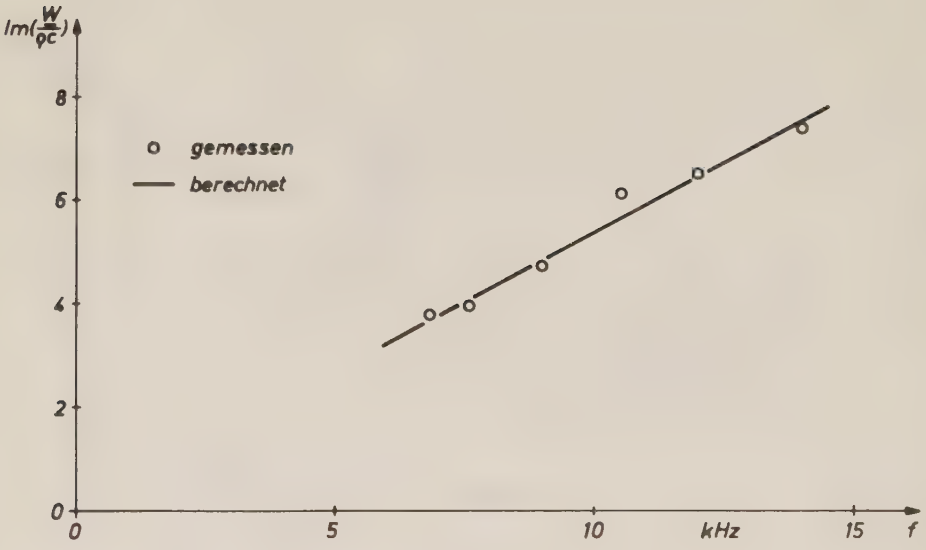

Fig. 12: Impedanz einer 1,5 cm dicken Messingplatte.

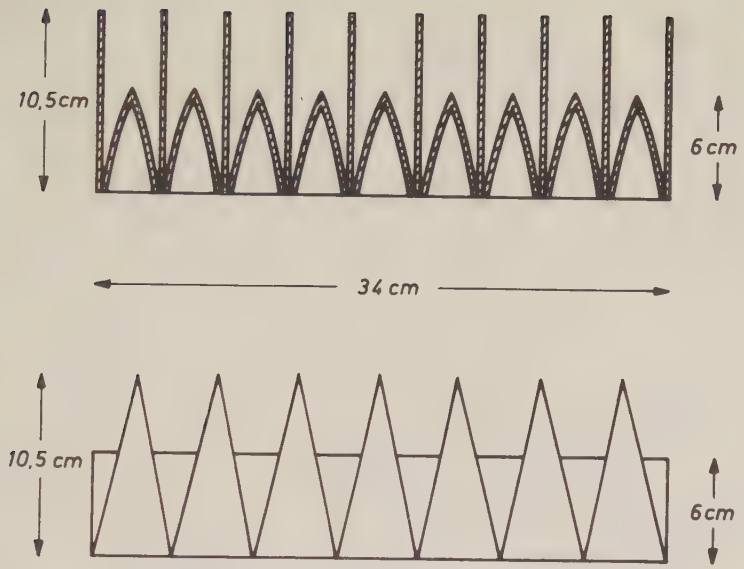

Fig. 13: Aufbau des großflächigen Keilabsorbers

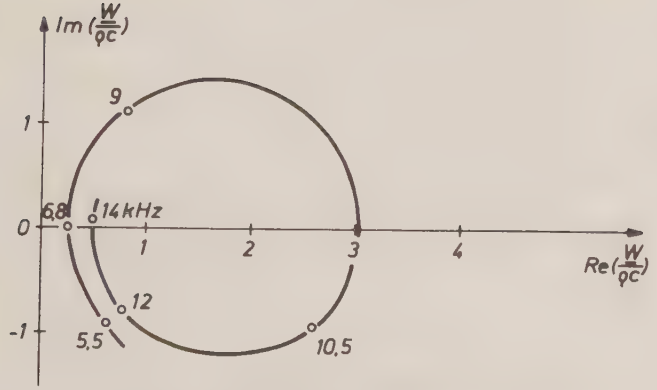

Fig. 14: Impedanzkurve des Keilabsorbers von Fig. 13.

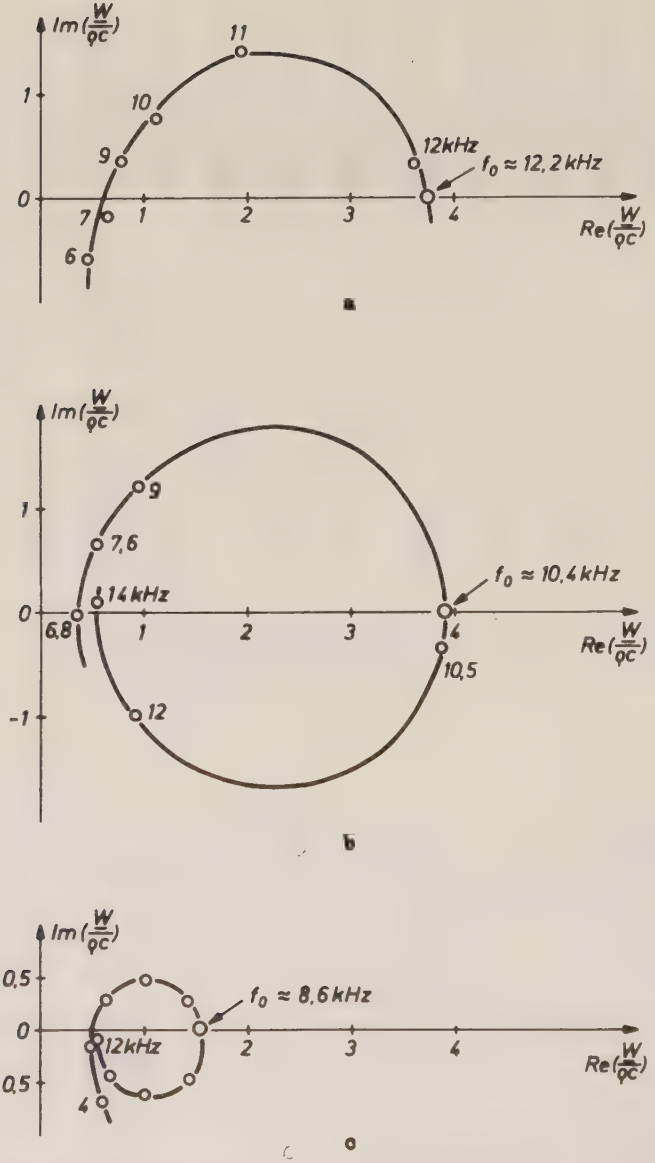

Fig. 15: Impedanzkurven einer Keilprobe

a) in der Wasserrinne gemessen, Einfallswinkel 45°
b) in der Wasserrinne gemessen, Einfallswinkel 25°
c) im Kundtschen Rohr gemessen, Einfallswinkel 0°.

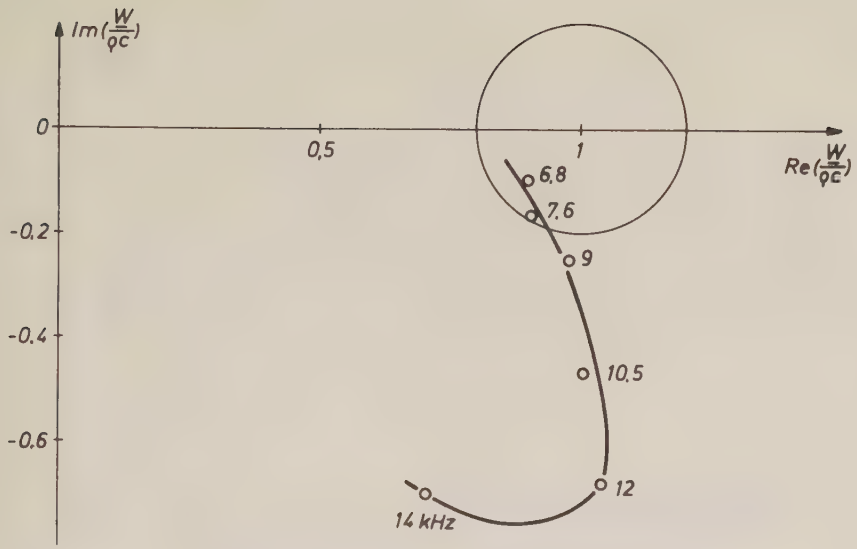

Fig. 16: Impedanzkurve eines Zweikreisabsorbers:
Rückmasse 4 mm,
Abstand Siebkörper - Rückmasse 6,5 mm,
μ = 1000 cSt.,
Schlitzbreite 0,140 mm.

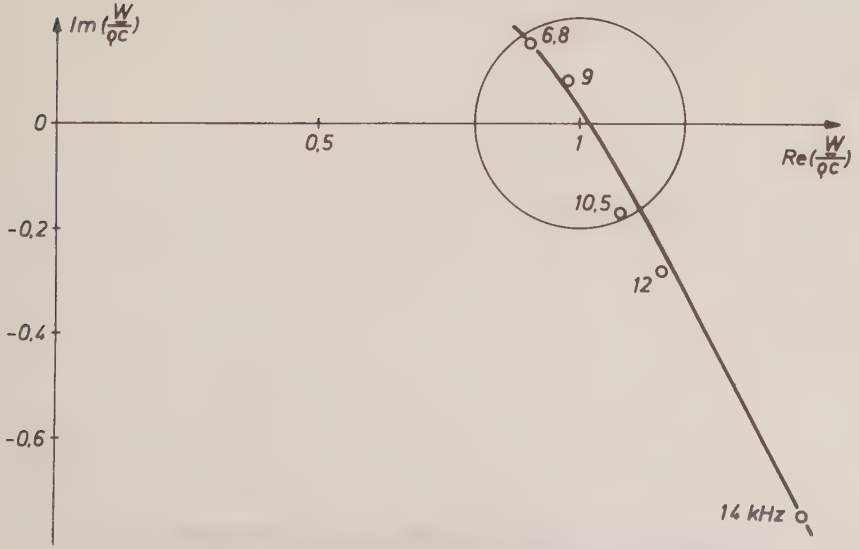

Fig. 17: Impedanzkurve eines Zweikreisresonanzabsorbers:
Rückmasse 4 mm,
Abstand Siebkörper - Rückmasse 3 mm,
μ = 1000 cSt.,
Schlitzbreite 0,140 mm.

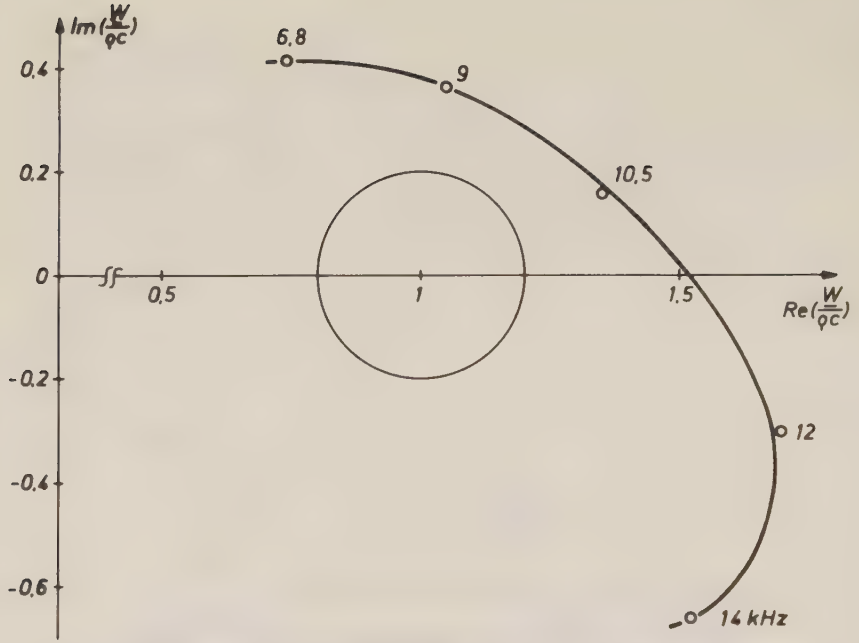

Fig. 18: Impedanzkurve eines Zweikreisresonanzabsorbers:
Rückmasse 2 mm,
Abstand Siebkörper - Rückmasse 3 mm,
μ = 1000 cSt.,
Schlitzbreite 0,140 mm.

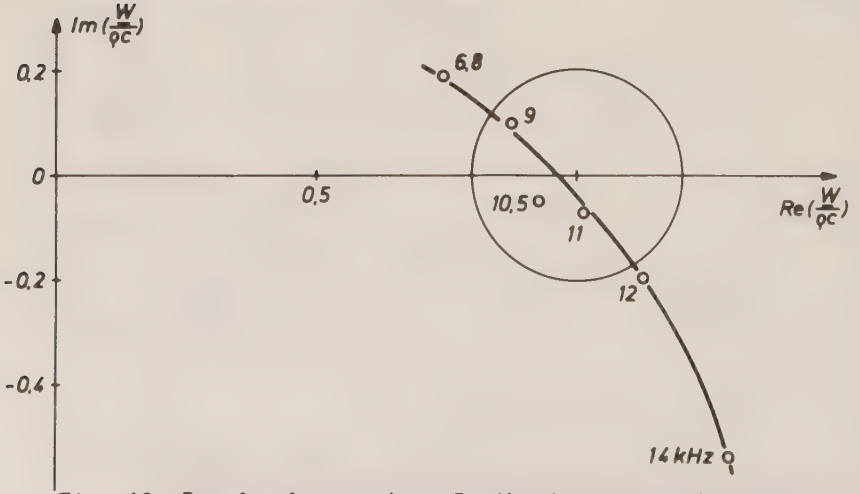

Fig. 19: Impedanzkurve eines Zweikreisresonanzabsorbers:
Rückmasse 2 mm,
Abstand Siebkörper - Rückmasse 6 mm,
μ = 1000 cSt.,
Schlitzbreite 0,140 mm.

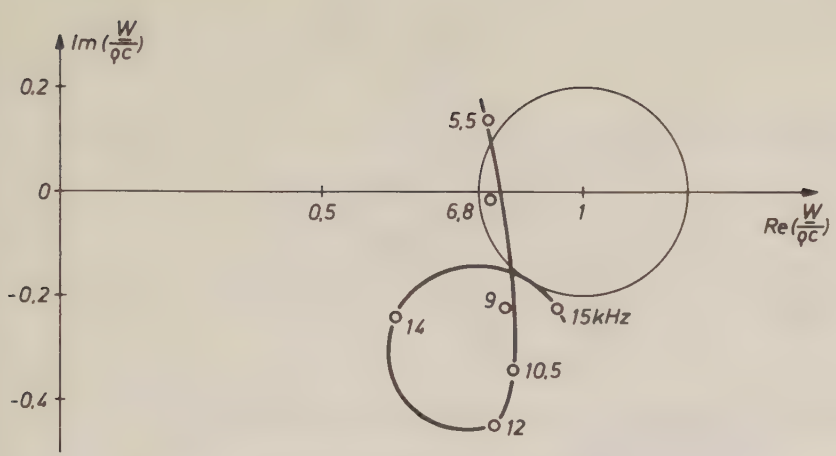

Fig. 20: Impedanzkurve eines Zweikreisresonanzabsorbers:
Rückmasse 2 mm,
Abstand Siebkörper - Rückmasse 10 mm,
μ = 1000 cSt.,
Schlitzbreite 0,140 mm.

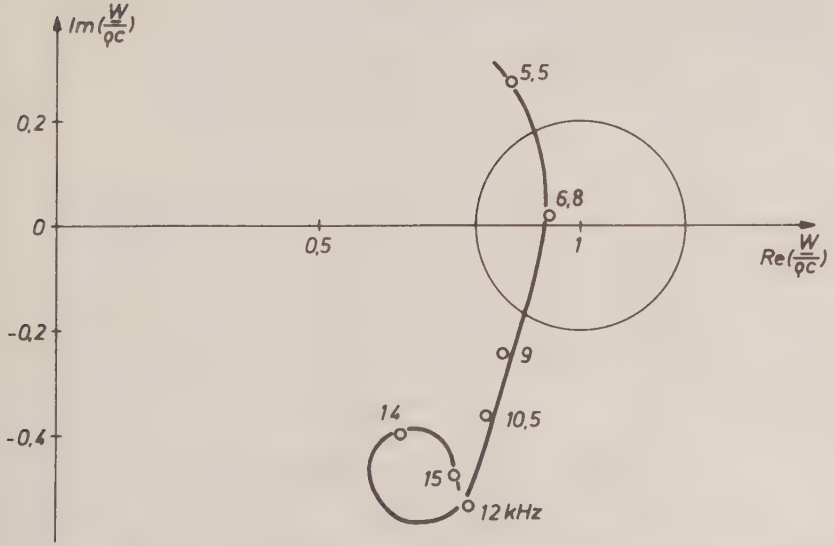

Fig. 21: Impedanzkurve eines Zweikreisresonanzabsorbers:
Rückmasse 2 mm,
Abstand Siebkörper - Rückmasse 10 mm,
μ = 1000 cSt.,
Schlitzbreite 0,129 mm.

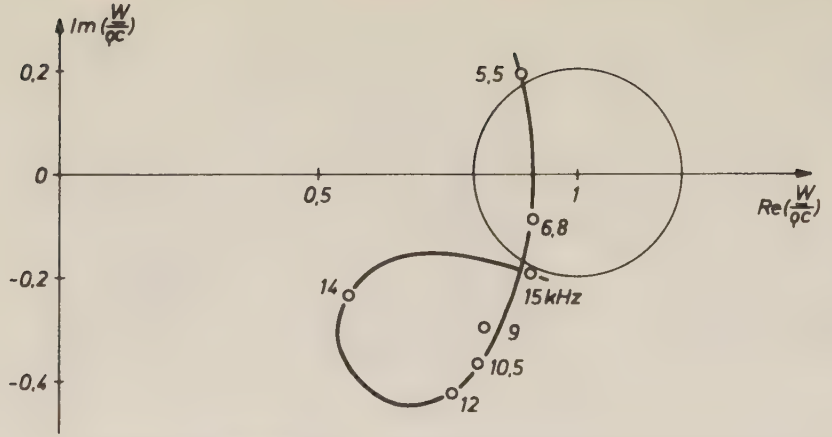

Fig. 22: Impedanzkurve eines Zweikreisresonanzabsorbers:
Rückmasse 2 mm,
Abstand Siebkörper - Rückmasse 10 mm,
μ = 1280 cSt.,
Schlitzbreite 0,140 mm.

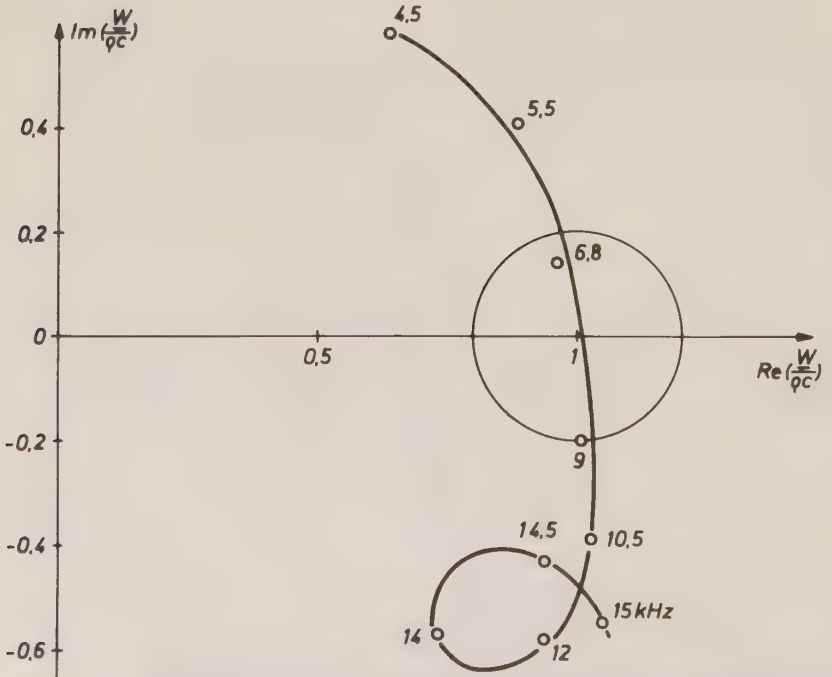

Fig. 23: Impedanzkurve eines Zweikreisresonanzabsorbers:
Rückmasse 2 mm,
Abstand Siebkörper - Rückmasse 7,5 mm,
μ = 1000 cSt.,
Schlitzbreite 0,129 mm.

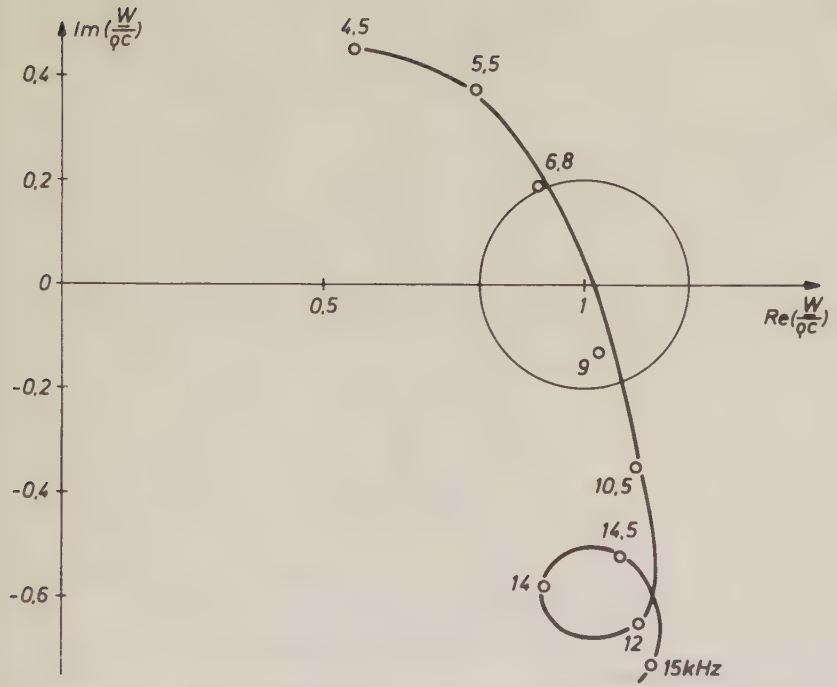

Fig. 24: Impedanzkurve eines Zweikreisresonanzabsorbers:
Rückmasse 2 mm,
Abstand Siebkörper - Rückmasse 7,5 mm,
μ = 1000 cSt.,
Schlitzbreite 0,129 mm,
weicherer Gummischlauch.

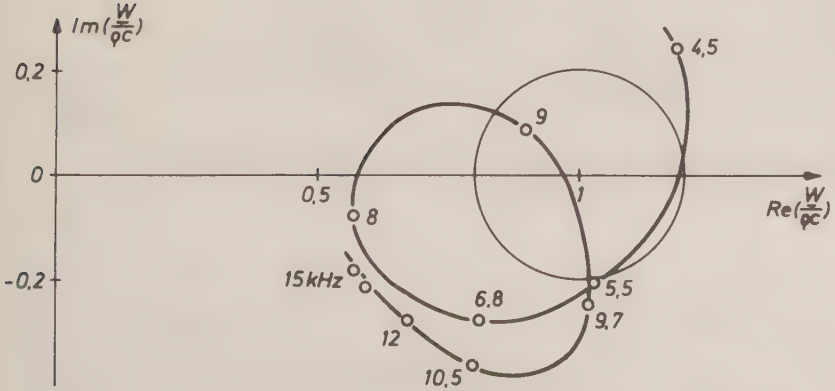

Fig. 25: Impedanzkurve eines Zweikreisresonanzabsorbers (abgeänderter Aufbau):
Rückmasse 4 mm, Abstand Siebkörper - Rückmasse 7 mm,
μ = 1000 cSt., Schlitzbreite 0,086 mm.

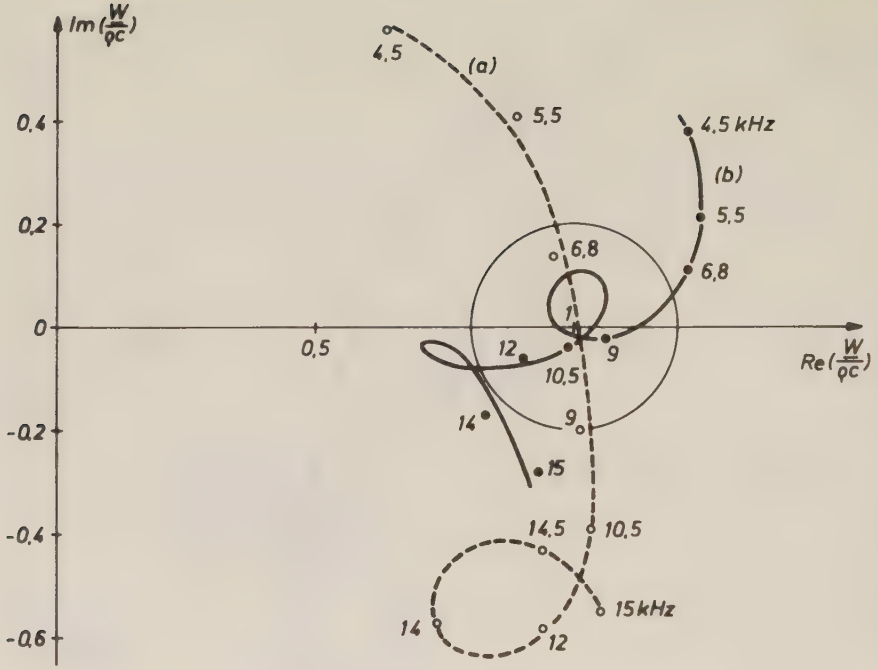

Fig. 26: Impedanzkurven:
(a) Zweikreisresonanzabsorber von Fig. 23,
(b) Kombination dieses Resonanzabsorbers mit einem Keilabsorber.

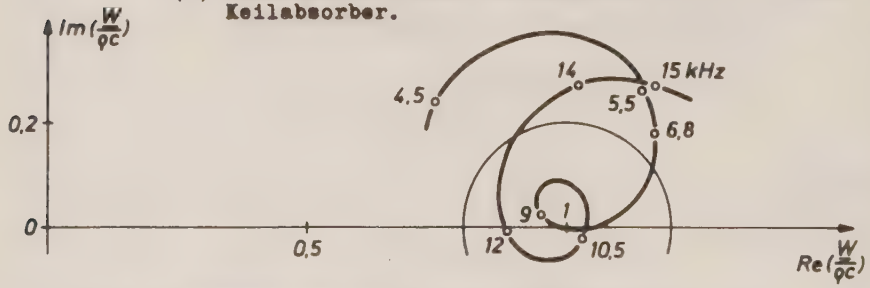

Fig. 27: Eingangsimpedanz der Absorberkombination von Fig. 26 im Freifeld.

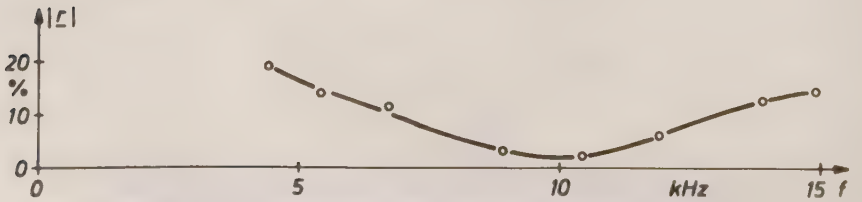

Fig. 28: Reflexionsfaktor der Absorberkombination von Fig. 26.

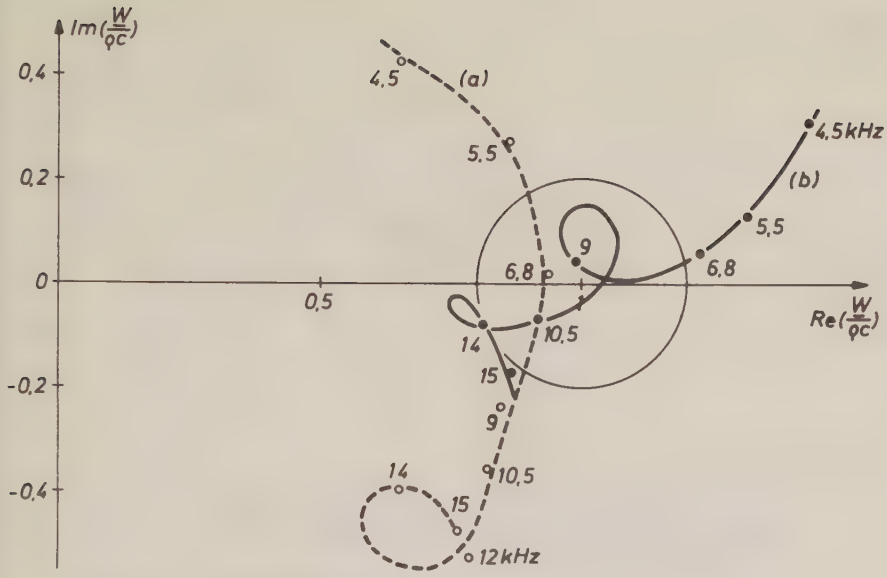

Fig. 29: Impedanzkurven:
(a) Zweikreisresonanzabsorber von Fig. 21,
(b) Kombination dieses Resonanzabsorbers mit einem Keilabsorber.

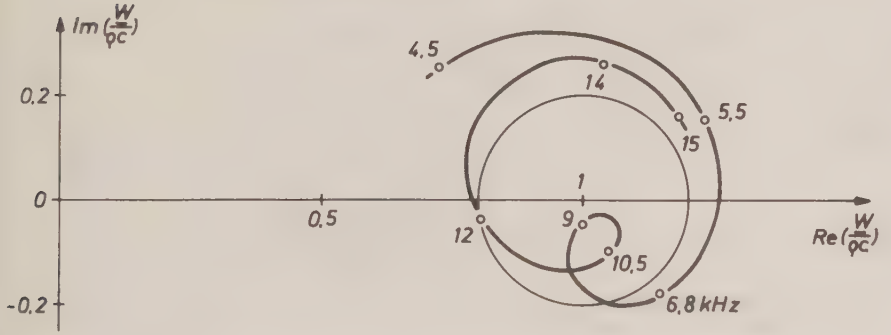

Fig. 30: Eingangsimpedanz der Absorberkombination von Fig. 29 im Freifeld.

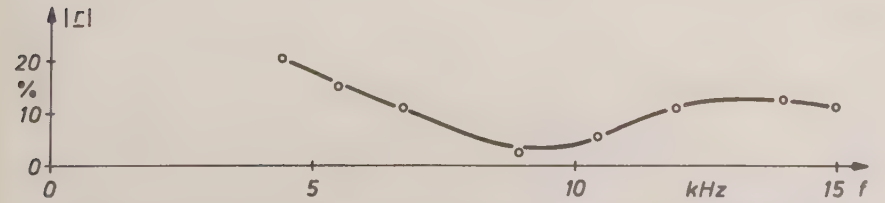

Fig. 31: Reflexionsfaktor der Absorberkombination von Fig. 29.

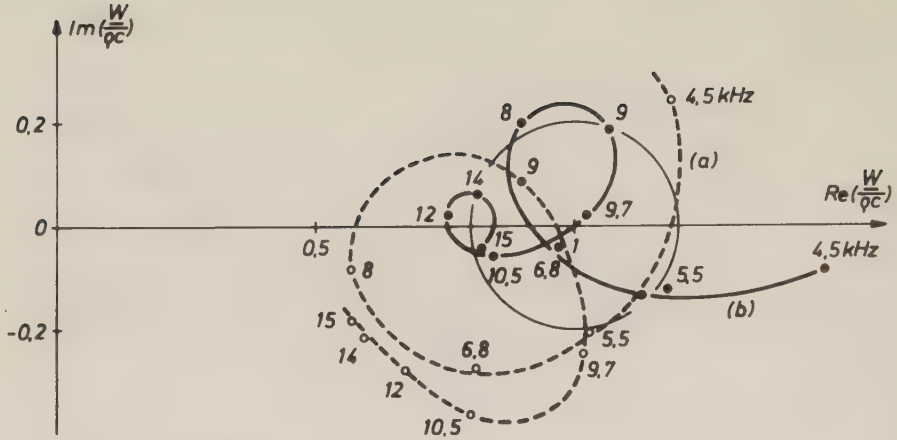

Fig. 32: Impedanzkurven:
(a) Zweikreisresonanzabsorber von Fig. 25,
(b) Kombination dieses Resonanzabsorbers mit einem Keilabsorber.

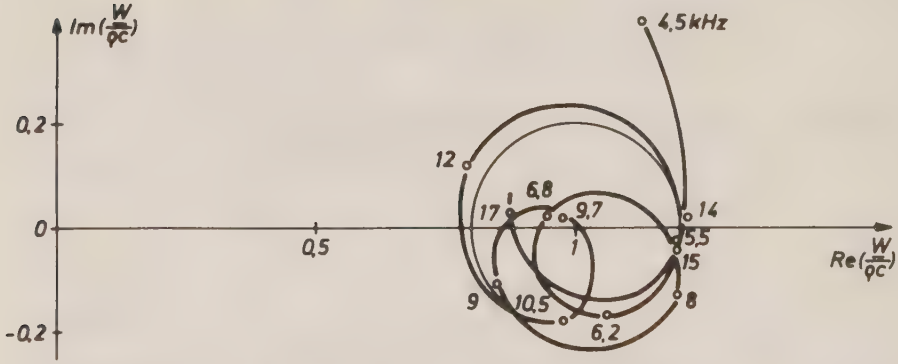

Fig. 33: Eingangsimpedanz der Absorberkombination von Fig. 32 im Freifeld.

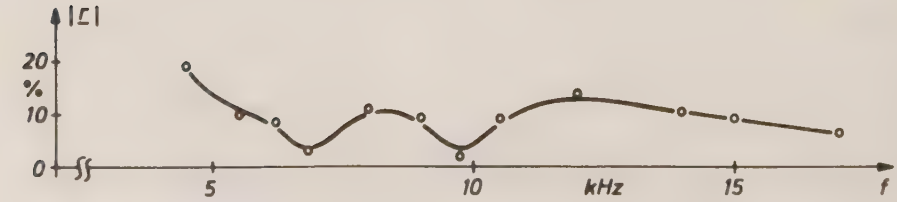

Fig. 34: Reflexionsfaktor der Absorberkombination von Fig. 32.

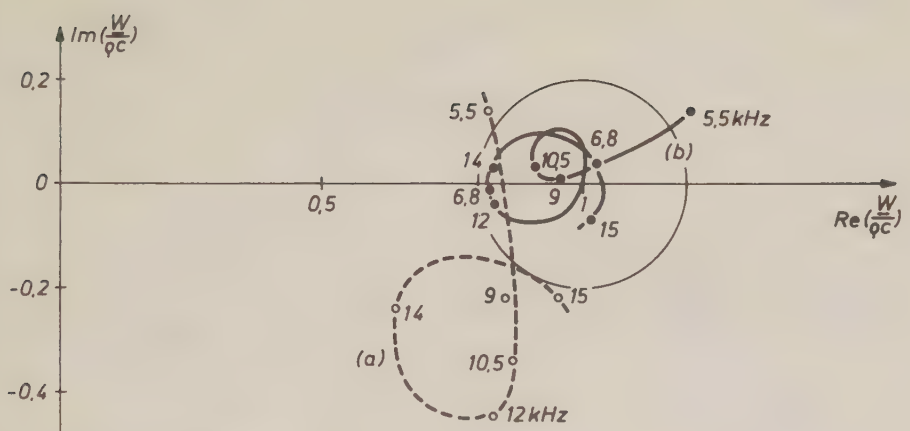

Fig. 35: Impedanzkurven:
(a) Zweikreisresonanzabsorber von Fig. 20,
(b) Kombination dieses Resonanzabsorbers mit einem Keilabsorber.

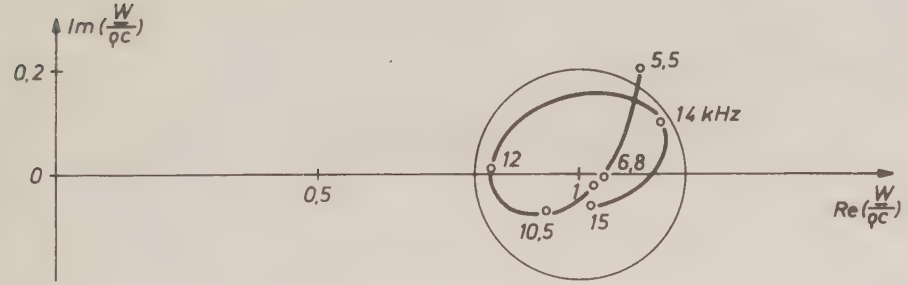

Fig. 36: Eingangsimpedanz der Absorberkombination von Fig. 35 im Freifeld.

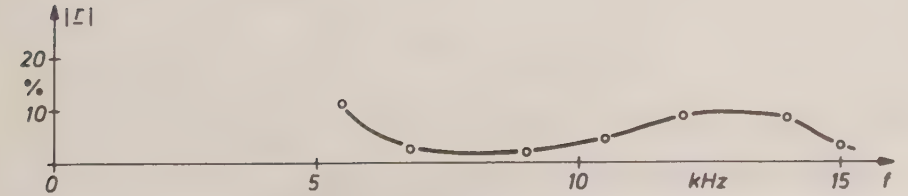

Fig. 37: Reflexionsfaktor der Absorberkombination von Fig. 35.

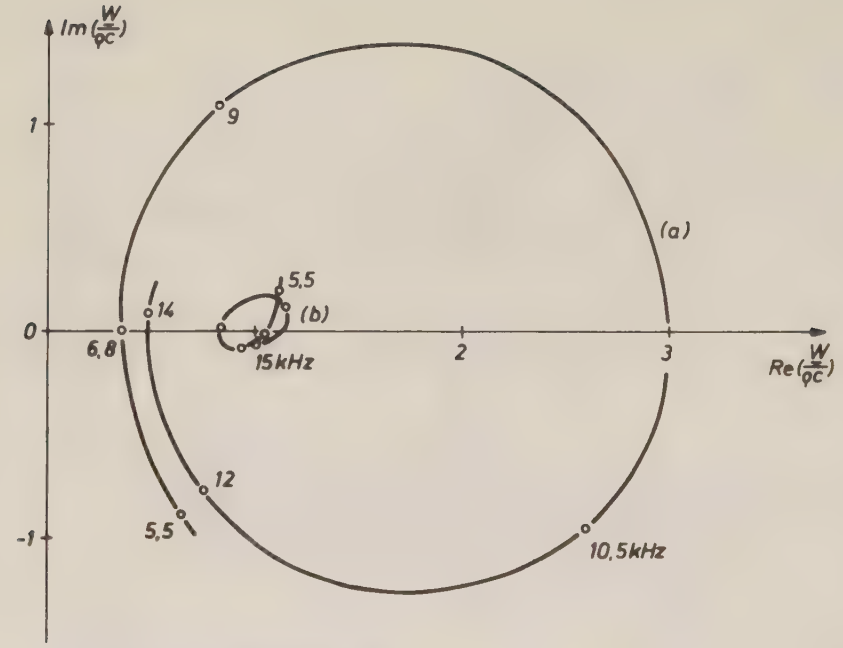

Fig. 38: Impedanzkurven:
(a) Keilabsorber
(b) Kombination dieses Keilabsorbers mit dem Resonanzabsorber von Fig. 20.

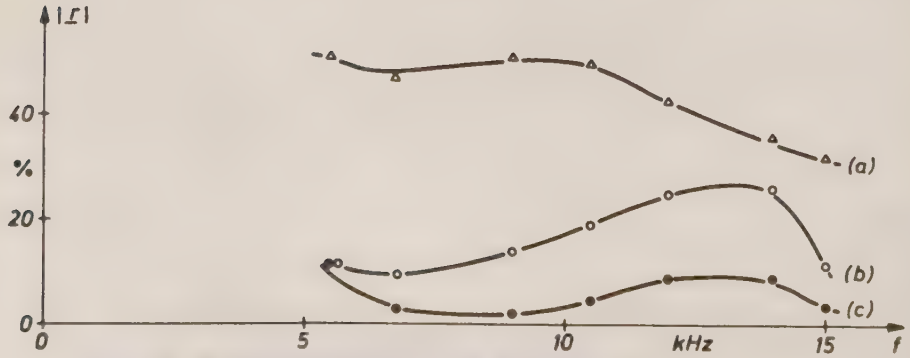

Fig. 39: Reflexionsfaktor: (a) Keilabsorber,
(b) Resonanzabsorber,
(c) Kombination dieser beiden Proben.

Lebenslauf

Am 10. Juli 1945 wurde ich als Sohn des Diplomkaufmanns Robert Ahlswede und seiner Ehefrau Susanne Ahlswede, geb. Modes, in Dresden geboren. Im Januar 1952 siedelten wir nach Halle bei Bodenwerder über, wo ich im selben Jahr in die Volksschule eintrat. Das Abitur bestand ich am 23. Februar 1965 am Schiller-Gymnasium Hameln. Als Leutnant der Reserve beendete ich im März 1967 meine zweijährige Dienstzeit bei der Bundeswehr. Seit dem 27. April 1967 bin ich als ordentlicher Student des Faches Physik in der mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultät an der Georg-August-Universität zu Göttingen eingeschrieben. Hier legte ich am 22.10.1969 die Vordiplomprüfung ab. In meiner am Dritten Physikalischen Institut durchgeführten Diplomarbeit mit dem Titel "Druckkammerverfahren zur Messung von Schallimpedanzen in Wasser" beschäftigte ich mich mit der Entwicklung eines Meßverfahrens zur Untersuchung von Wasserschallabsorbern. Nach dem Diplomhauptexamen am 15.12.1971 blieb ich am Dritten Physikalischen Institut und fertigte dort die vorliegende Dissertation an.